



姚卓森, 秦克章. 2014. 造山带中岩浆铜镍硫化物矿床的地球物理勘探: 现状、问题与展望. 地球物理学进展, 29(6): 2800-2817, doi: 10. 6038/pg20140649.

YAO Zhuo-sen, QIN Ke-zhang. 2014. Geophysical exploration for magmatic Cu-Ni sulfide deposits in the orogenic belt: current status, problems and vistas. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(6): 2800-2817, doi: 10. 6038/pg20140649.

## 造山带中岩浆铜镍硫化物矿床的地球物理勘探: 现状、问题与展望 Geophysical exploration for magmatic Cu-Ni sulfide deposits in the orogenic belt: current status, problems and vistas

姚卓森<sup>1,2</sup>, 秦克章<sup>1\*</sup>

YAO Zhuo-sen<sup>1,2</sup>, QIN Ke-zhang<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**摘要** 地球物理勘探在众多岩浆铜镍硫化物矿床的发现中起着重要的作用。相对于围岩, 硫化物矿石在电学、密度和磁化率等物理性质方面有着显著的差异性, 产生高重力、高磁力、高极化和低电阻的地球物理异常, 是岩浆铜镍硫化物矿床传统地球物理勘探方法的理论基础。造山带中铜镍硫化物矿床通常具有小岩体成大矿的特征, 以中亚造山带的东天山和喀拉通克地区最为突出。这类矿床通常表现出复杂的岩体形态、产状、岩相构成、赋矿岩相和矿体空间展布, 给传统地球物理勘查工作提出挑战。国外铜镍矿最大探测深度已达到 4000 m, 最大开采深度也达到 2450 m, 而我国同类矿床分别只有 1600 m 和 900 m 左右, 亟待提高。以高分辨率浅层地震波反射、地-井瞬变电磁法、井中重力勘探和航空电磁法为代表的地球物理新进展则为这一问题带来新思路, 可能代表着铜镍硫化物矿床大深度精细勘探的发展趋势。

**关键词** 铜镍硫化物矿床; 常规地球物理勘探; 金属矿地震勘探; 地-井瞬变电磁法; 航空电磁法; 造山带环境

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10. 6038/pg20140649

**Abstract** Geophysical explorations have played an important role in the discovery of many magmatic Cu-Ni sulfide deposits. Comparing to the surrounding country rocks, sulfide ores possess strong anomaly in many physical properties including electrical property, density and magnetic susceptibility, leading to the geophysical anomalies of higher magnetic force, higher gravity, higher polarizability and lower resistivity, which is the theoretical basis of the traditional geophysical methods for magmatic Cu-Ni sulfide deposits. In Central Asian Orogenic Belt(CAOB), the deposits mostly show the characteristic that large Cu-Ni deposits occurred in small intrusions, especially in Eastern Tianshan Ni-Cu belt and Kalatongke ore district. These Ni-Cu deposits occurred in CAOAB are so much complicated in intrusion size, occurrence, lithofacies, ore-bearing lithology and space distribution of orebodies, making the traditional geophysical exploration in the orogenic belts is more difficult. The maximum exploitation depth of foreign Ni-Cu deposits has reached more than 4000 meters, and the largest mining depth is 2450 meters. Whereas, the similar type of deposits are only 1600 meters and 900 meters respectively, which needs to be improved. Recent development in geophysical technology, including high-resolution shallow-level seismic reflection, borehole transient electromagnetic method, borehole gravity and airborne electromagnetic, throw light on these problems, and may represent the development tendency of fine exploration for Cu-Ni deposit in the near future.

**Keywords** Cu-Ni sulfide deposit; geophysical exploration; shallow-level seismic prospecting; borehole TEM; airborne electromagnetic; orogenic belt environment

## 0 引言

岩浆型铜镍硫化物矿床是指与镁铁质-超镁铁质岩相关的富含 Cu、Ni 的硫化物矿床, 是世界上铜、镍、铂族元素的最重要来源, 同时还可以用于区域大地构造演化、镁铁质-超镁

铁质岩浆过程示踪研究, 具有重要的经济意义和科学价值(Barnes and Lightfoot, 2005; 柴凤梅等, 2005; 吕林素等, 2007)。这类矿床的勘探和研究始于 1856 年加拿大 Sudbury 矿床的发现, 到目前已有近 160 年的历史。在几代人的努力下, 铜镍硫化物矿床的地质研究程度不断加深并日臻成熟,

收稿日期 2014-03-29; 修回日期 2014-06-18.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 本文得到国家自然科学基金重点项目(41030424)和新疆有色集团东天山、喀拉通克铜镍硫化物矿床预测评价研究项目联合资助。

作者简介 姚卓森, 男, 1990 年生, 在读博士生, 研究方向为铜镍硫化物矿床的地质-地球物理模型构建。(E-mail: yaozhuosen@163.com)

\* 通讯作者 秦克章, 男, 1964 年生, 研究员, 从事内生金属矿床成矿规律与成矿预测研究。(E-mails: kzq@mail.iggcas.ac.cn)

另一方面,随着勘查程度的加深,易于发现的近地表铜镍硫化物矿床已越来越少,对这类矿床的勘探难以单一依靠传统的地质填图和预测,而更多地倚重于地球物理勘探方法,并且物探技术方法在盲矿体的勘探中有着令人印象深刻的表现和贡献(Balch *et al.*, 2010),故地球物理在铜镍硫化物矿床的勘探中显得愈发重要和迫切。

世界上地球物理勘探持续时间最长、投入精力最多、运用手段最丰富的铜镍矿是 Sudbury 矿区。它位于加拿大地盾南部,矿区内与成矿相关的基性-超基性岩体呈向斜盆地展布,长 60 km,宽约 27 km,是世界上最著名的铜镍矿集区,包括 40 多个矿床,其中储量可达大型矿床的多达十几处(Barnes and Lightfoot, 2005)。随后,研究人员将其作为铜镍矿地质研究和地球物理勘探的模板,试图在与其类似的 Duluth、Great Dyke、Kegonsapit、Muskox、Skaergaard 等大型层状岩体底部寻找铜镍硫化物矿床,但是经过半个世纪的努力大多没有取得显著的成果(Maier *et al.*, 2001)。与此同时却在小型镁铁质-超镁铁质岩体中发现一系列超大型 Ni-Cu 硫化物矿床,如中国的金川、俄罗斯的 Noril'sk-Talnakh、加拿大的 Voisey's Bay 等,但这几处矿床均产于克拉通内部或其边缘。进一步的研究认为, Sudbury 矿床的形成与陨石撞击引起的地壳熔融有关(Mungall *et al.*, 2004),并不具有典型性,大型铜镍硫化物矿床更多产出于小型基性超基性岩体中。汤中立等(1996a, 1996b, 2006, 2007, 2011)针对这一现象提出“小岩体成大矿”的重要思想,其中小岩体是一个相对的概念,即侵入岩体的出露面积较小,可以大到  $n(n < 10) \text{ km}^2$ ,小到  $0.00 \text{ nkm}^2$ ,一般在  $1 \text{ km}^2$  左右或者更小,但侵入体内部或周围的矿体呈现出“大且富”的特征,通常达到大型或者超大型的规模,岩体的矿化率(矿体体积/岩体体积  $\times 100\%$ )高。世界上著名的 Noril'sk-Talnakh、金川、Voisey's Bay 等超大型岩浆铜镍硫化物矿床,以及中国几乎所有的岩浆铜镍矿床均体现出“小岩体成大矿”的特征,尤其以北疆地区东天山铜镍矿带、喀拉通克岩体群以及吉林红旗岭岩体群最为典型。随着中亚造山带中喀拉通克、黄山、黄山东、图拉尔根、坡一、坡十等一系列造山带中岩浆铜镍硫化物矿床的发现和深部探矿工作的突破,使得北疆地区成为我国最具铜镍找矿前景的地区(秦克章等, 2012),其形成环境也不同于产于克拉通环境的金川以及西伯利亚大火成岩省中的 Noril'sk-Talnakh 铜镍铂矿区。总结分析造山带中岩浆铜镍矿床在地球物理场中所表现出的特点和复杂性,从而优化针对性的勘查技术方法组合,提高地质-地球物理模型的精度,在我国相关地区的铜镍矿勘探中显得尤为重要。

随着地球物理勘探方法和技术手段的不断发展和革新,越来越多的物探方法投入到岩浆型铜镍硫化物矿床勘探中(King, 2007),形式更加多样化,从最初的重磁法勘探到大地电磁法,再到目前开始应用的高分辨率浅层地震勘探(Malehmir *et al.*, 2014)和地-井瞬变电磁测量(King, 1996; 张杰等, 2013),工作平台也从地面延拓到航空和钻孔中,使得有效性和适用性得到极大的提高,也在很大程度上促进了铜镍矿的勘探工作。

本文首先基于主要岩矿石与围岩间的物性差异,细致分析其物性特点,从方法的物理机制角度论述传统的“重-磁-

电”结合的地球物理勘探方法在铜镍硫化物矿床勘探的适用性与有效性。然后,在这一理论前提下,主要以北疆地区东天山铜镍矿带和阿尔泰山喀拉通克岩体群为例,研究古生代造山带中铜镍硫化物的特殊性,揭示出其复杂矿床地质条件对传统地球物理勘探方法的有效运用提出很大挑战。继之,分别介绍四种近期才引入到铜镍矿勘探的地球物理方法,各有专长和优势,以期能够解决在北疆地区所遇到的难题,一定程度上代表着当前铜镍硫化物矿床地球物理勘探的新思路和发展趋势,最后对未来的发展方向进行些许展望。

## 1 铜镍硫化物矿体“三高一低”的物性特征与常规勘探方法

矿物和岩石的物理性质是维系地质背景知识与地球物理数据的纽带,其与地球物理响应间的关系是运用地球物理方法圈定目标含矿岩体特别是矿体的关键所在(Mcgaughey, 2007; Chopping and van der Wielen, 2011)。岩石物性之间存在显著的差异是地球物理勘探方法有效性的物理学基础,而在矿化形成过程中所引起物性的不均匀分布使得其在地面也表现出地球物理的异常响应,从而为相关矿床的勘探提供有用信息,这一点在岩浆型铜镍矿的勘探上体现的尤为明显。

岩浆型铜镍矿的主要矿石矿物为镍黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿,容矿岩石均为超镁铁质、镁铁质岩石。表 1 中总结出铜镍硫化物矿床的矿石矿物与通常的含矿岩石及围岩,在磁化率、密度和电阻率方面的常见范围及平均值,由此可知铜镍硫化物矿体通常具有高磁性、高密度、高极化率、低电阻率的物性特征,称为“三高一低”(邓振球, 1990; 肖骑彬等, 2005; 吴华等, 2006; 惠卫东等, 2011; 杨学立, 2012; 邵行来, 2012)。

正是由于存在如此显著的物性差异,人们在长期以来的勘探工作中逐步建立起一套针对铜镍矿行之有效的“重-磁-电”联合勘探方法,以高精度地面重、磁扫面为先导,然后在优选靶区开展大功率激电和电磁测深,圈定可能的低阻矿体,取得显著的勘探成果。下面将从物性差异的角度分析并估计岩矿石可能的地球物理响应,研究各勘探方法的有效性与合理性,并指出矿区内可能存在的干扰因素。

### 1.1 铜镍硫化物矿体的高密度、高磁性与重磁勘探

由表 1 可知铜镍矿常见的硫化物密度均在  $4.0 \text{ g/cm}^3$  以上,相对于常见的围岩类型来说,有着异常显著的密度差异,而通常的容矿岩石——镁铁质、超镁铁质岩石的密度虽然也相对较高(一般在  $3.0 \text{ g/cm}^3$  左右),但对比矿石矿物仍有 30% 左右的密度差异,故成矿过程中的硫化物液滴经重力分异沉于岩体的底部或在流动分异中汇聚于产状突然变缓部位。密度差异同样也决定区域内的高重力异常,可以直接探测镁铁质、超镁铁质含矿岩特别是块状硫化物矿石,使其成为铜镍矿勘探的一种有效的区域性圈定方法。

但是,如果矿区内块状、半块状、海绵陨铁状、斑杂状矿石(硫化物含量大于 30%~60%)并不发育,而多以星点状、浸染状矿石为主(硫化物含量 2%~10%)时,由于矿石矿物含量不高,其高密度异常并不明显,使得通过重力勘探直接寻找矿体的效果并不显著,如吉林红旗岭 3# 岩体处的重力

表 1 铜镍硫化物矿床矿石矿物与含矿容岩的磁化率、密度、电阻率值(据 King, 2007 补充)

Table 1 Ni-Cu-Sulphide Ore Mineral and Host rock Magnetic Susceptibilities, Densities and Electrical Resistivities (from King, 2007 with some addition)

物理性质		磁化率( $10^3$ SI)		密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		电阻率( $\text{ohm}\cdot\text{m}$ )	
岩石、矿物类型		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
硫化物/ 氧化物	磁黄铁矿	1~6000	1500	4.5~4.8	4.65	$6\sim 160\times 10^{-6}$ *	$10^{-5}$ *
	—单斜晶系		700				$\sim 3\times 10^{-6}$ **
	—六方晶系		2				$\sim 5\times 10^{-6}$ **
	镍黄铁矿		<1		4.8 ***	$1\sim 11\times 10^{-6}$ *	$5\times 10^{-6}$ *
	黄铜矿		0.7	4.1~4.3	4.2	$1.5\sim 90\times 10^{-4}$ *	$5\times 10^{-4}$ *
	磁铁矿	1200~19200	6000	4.9~5.2	5.12	$5\times 10^{-5}\sim 5.7\times 10^3$	
容矿岩石	长英质岩石	0.04~52 ****	8	2.3~3.11	2.61	$4.5\times 10^3$ (湿)~ $1.3\times 10^6$ (干)	
	镁铁质岩石	0.5~122	25	2.09~3.17	2.79	$10^3\sim 10^6$	
	超镁铁质岩石 (橄榄岩)	90~200	150	2.78~3.37	3.15	$3\times 10^3$ (湿)~ $6.5\times 10^3$ (干)	
	—蛇纹石化	中-高	中-高				
其它	含碳地层					$10^{-4}\sim 5\times 10^{-3}$	
	表土覆盖层	0~0.036				1~1000	

\* Carmichael 1989; \*\* Emerson *et al* 2001; \*\*\* Mateck 2007; \*\*\*\* <http://www.ukm.my/rahim/magnetic%20lecture.htm>.

异常主要反映的是岩体的异常,能提取出的矿化信息较少(杨学立, 2012). 另一方面,岩石中铁的含量也需要引起注意,因为含铁氧化物、较贫铁的铁硫化物(黄铁矿的密度范围为 $4.9\sim 5.2\text{ g}/\text{cm}^3$ )以及含铁量较高的镁铁质、超镁铁质岩石(Fo 值偏低)也有着较大密度,故而对根据高重力异常直接圈定铜镍硫化物矿体造成一定干扰(King, 2007).

值得注意的是,不论岩性如何,只要有一定密度差异和规模都可以形成相应的高重力异常,并不一定对应于含铜镍矿化的镁铁质-超镁铁质岩体. 岩体的密度还会受到蚀变的影响,东天山地区的葫芦、马蹄岩体由于地表和浅部受到强烈蚀变作用(纤闪石化和蛇纹石化),使得其密度普遍减小,在重力测量中反而表现为一定程度的低重力异常(邓振球, 1990),北山坡一、坡十岩体地表出露的蛇纹石化含矿纯橄岩相对周边的辉长岩就表现为重力低异常. 所以,不能一概而论,直接将区域内的重力高异常认定为含矿岩体.

重力勘探之外,还经常配合采用磁法勘探,因为主要的矿石矿物——磁黄铁矿具有很高的磁化率(见表 1,平均为 $1.5\times 10^6$  SI),其含量越高,磁性也越强,故矿石磁性与其品位大致呈正相关关系(邵行来, 2012). 而常见的围岩类型中,中-酸性岩的磁性较弱,花岗岩和沉积岩围岩的磁性最弱,为弱磁-无磁性,使得含矿的镁铁质、超镁铁质岩体在大规模磁测中体现出显著的高磁异常. 近期在美国 Tamarack 附近发现的 Eagle 铜镍矿即是在磁测图中通过磁异常圈定的一个面积积极小的超镁铁质岩体,通过进一步勘探工作确定的(Ding *et al.*, 2010). 不过,磁异常强度还与岩体的规模及是否出露地表相关,东天山图拉尔根铜镍矿由于岩体规模小( $0.004\text{ km}^2$ ),而周围中基性火山岩及闪长岩体的磁性较强,

故在航磁图上并无明显的磁异常,而在地面高精度磁测中表现为高达 4400 nT 的强磁异常(邵行来等, 2012).

另一方面,作为铜镍矿床物理响应主要控制因素的磁黄铁矿,其晶格类型不同,结晶温度不同(秦克章等, 2007),磁性也不尽相同. 单斜晶系的磁黄铁矿属于 300 °C 以下的低温变体,具有中等程度的顺磁性,而高温变体六方晶系磁黄铁矿则不具磁性,这在加拿大的 Voisey's Bay 铜镍矿中体现的尤为明显(King, 2007). 同样,镁铁质、超镁铁质岩石虽通常具有一定的磁性,但并非全部都有,比如 Voisey's Bay 的容矿岩石—橄长岩和超镁铁岩就不具磁性. 更加值得注意的是,橄榄石在蛇纹石化过程中会析出大量的粉尘状磁铁矿,而在同等含量的前提下,磁铁矿所显示出的磁异常要比磁黄铁矿至少高出 10 倍,故会对铜镍矿体的勘探产生很大的干扰(姜常义等, 2012). 但是,磁铁矿只是蛇纹石化的常见产物,并不是任何时候都会出现,其产生与蛇纹石化程度、蛇纹石的重结晶、相互间置换反应、蚀变温度以及  $\text{SiO}_2$  的活度相关(黄瑞芳等, 2013). 另外,含磁性矿物的沉积物、变质的含矿容岩(蛇纹石化,角闪岩等)以及具有磁性的侵入体(岩浆成因角闪石通常具一定磁性)均对铜镍矿的磁法勘探有着一定程度的影响.

重力和磁法作为先导性的勘探工作,都会受到其它因素的干扰,并不能直接反应铜镍硫化物矿体的地球物理响应,更多的是将两者相互结合来确定地下高密度、强磁性的含矿岩体的存在与否以及赋存空间,即所谓的“重磁同源”. 东天山康古尔塔格-黄山断裂带有着显著的重、磁异常高值区,其中存在一系列局部重力异常,并多有高磁异常与之相对应,体现出较好的重、磁局部异常同源性,其平面位置即囊括黄

山、土墩、镜儿泉及图拉尔根等重要的成矿区段(惠卫东等, 2011;邵行来, 2012)。在白石泉、黄山、黄山东、葫芦、图拉尔根、喀拉通克等单个矿区中,含矿岩体也都体现出显著的重磁同源特点。2007年在赞比亚南部发现的Munali铜镍矿体赋存于辉长岩中,有较强的变质作用,磁黄铁矿构成66%的硫化物,故在磁法勘探中有着明显的高磁异常。将航磁数据、地面高精度磁测数据、重力勘探数据与该地区的地质图相叠合,发现带状的重磁异常与已经发现的三处矿体位置达到很好的吻合,得出辉长岩体的空间分布关系,从而指导随后的勘探工作(Witherly, 2009)。

铜镍硫化物矿体有着显著的高密度、高磁化率异常,但是由于重力和磁法勘探多为面积性工作,分辨精度不高,且较多受到蚀变等因素的干扰,更多的是相互配合,运用于大范围的地质构造解译(姜德波等, 2008),并结合“重磁同源”的特点来圈定可能含矿的镁铁质-超镁铁质岩体。

## 1.2 铜镍硫化物矿体的低电阻率、高极化率与电法勘探

由表1可知,在电阻率方面铜镍硫化物矿体与含矿围岩之间有着巨大的差异,可达好几个数量级,其极低的电阻率使得电学勘探方法在铜镍矿的勘探中得到极大的应用。从最初的电阻率剖面法到目前的电磁测深法,电法勘探在铜镍矿床的寻找和发现中取得累累硕果,尤其是近期广泛采用的以瞬变电磁法为代表的勘探工作。徐贵东等(2010)在吉林红旗岭铜镍矿勘探中采用瞬变电磁法(TEM)将深部视电阻率低于100  $\Omega\text{m}$ 的极低阻部分定为矿化体。杨学立(2012)在红旗岭铜镍矿中通过CSAMT二维反演和重磁小波细节分析对3号岩体没有钻孔控制区域的赋矿特征进行评价,圈定部分有利靶区。梁光河等(2007)以新疆图拉尔根铜镍矿为例研究大地电磁测深法(MT, GMS-06系统)在铜镍矿勘探中的应用,采用TE、TM联合模式,进行Rebocc二维反演,认为得到的视电阻率-深度剖面中3个明显相连或断续相连的低阻体对应于矿化岩体,随后得到钻孔证实。邵行来等(2010)在哈密葫芦铜镍矿开展大比例尺的地球物理勘探工作,认为TEM测深所得的视电阻率-深度剖面中,低阻异常不仅与岩体有关,还与区域断裂和变形带有关。沈远超等(2007)在镜儿泉铜镍矿根据连续电阻率成像系统EH4勘探得到的视电阻率-深度剖面,圈定葫芦复式岩体的形态,划分出岩体的不同相带,并推断岩体较低电阻率背景值下的中低电阻率异常区对应矿化区。

铜镍硫化物矿体的低电阻率源于含矿岩石的形成过程中存在许多空隙,其中部分或者全部被高导电性的硫化物所充填。低电阻含矿岩石的导电过程不可能是岩石、矿物本身离子或电子的迁移过程,而是相互连通的高导电性硫化物所引起。故对于含矿岩体来说,硫化物含量的不同,其连通性质的差异决定其电阻率值(邵行来等, 2010)。块状、半块状矿石,或海绵陨铁结构岩石有着极低的电阻率值,Voisey's Bay铜镍矿中的Ovoid矿体由于有着厚达100 m的块状硫化物矿石,使得其在电磁勘探中引起极大的低电阻率异常,但在大岩体中如果块状矿体规模较小则不能引起同样程度的低电阻率异常。而且,通常情况下较低的电阻率并不只是岩体中含硫化物较多的矿石引起的,还有可能是因为岩体受挤压破碎使流体充填其中而导致的,这无疑增加了电法剖面的解译

难度。更为复杂的是,铜镍矿区的围岩中时常会有含碳质、石墨地层存在,由上表可知其电阻率的范围( $10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} \Omega\text{m}$ )与硫化物相近,使得整个矿区因处于低电阻率的背景中而难以精确地确定矿体的位置,新疆喀拉通克铜镍矿区、图拉尔根、黄山东矿区均遇到这一情况(邓振球, 1990)。不过,自然界中形成的石墨层通常情况下厚度有限,并不能像矿体一样有着十几米~百余米的厚度,所以两者在电导值(电阻率 $\times$ 厚度)上还是有着相当大的差异,通过精细的工作,能够在一定程度上对其进行有效的区分,但是对相应仪器的勘探精度提出很高的要求(King, 2007)。

厚大的块状矿体有着显著低电阻率异常,而脉状、浸染状铜镍硫化物矿体则对应于高极化率异常。从激发极化的原理上来看,块矿属于面极化特性,激发极化发生在其与围岩的界面上,而浸染状矿石属于体极化特性,硫化物颗粒组成极化单元分布于整个岩体中。岩矿石的极化率主要取决于所含电子导电矿物(即硫化物)的体积百分含量,含量增高激电效应增强,故浸染状的铜镍硫化物矿体有着高的极化率值。邹海洋(2002)在喀拉通克铜镍矿区运用双频激电和大功率低频激电测深有效地圈定一个低电阻率、高极化率的板状异常体,埋深180 m。新疆有色704队在东天山图拉尔根铜镍矿开展物探激电工作,以极化率3%~5%圈定的极化率异常与含量岩体分布范围完全一致(三金柱等, 2007;惠卫东等, 2011)。吴华等(2006)在白石泉矿区则以6.5%圈定出7个与含矿岩体相对应的高极化率异常区。而付开泉和李百祥(2006)在金川铜镍矿区选择4%的极化率异常区域作为岩体的边界范围。诚然,高极化率异常的圈定阈值因矿区自身地质情况的不同而异,但是不可否认的是,其在铜镍矿体尤其是浸染状矿化的圈定中发挥出巨大的作用。

但是,通常出现在镁铁质、超镁铁质岩石中的磁铁矿仍会产生一定的干扰,研究认为浸染状的磁铁矿在岩体中也会产生显著的高极化率异常(King, 2007),所以在通过高极化率异常来勘探低品位硫化物矿体时,磁铁矿的含量甚至周边围岩中的磁铁矿与具弱磁性的角闪石的存在需要引起相当的重视和注意。

由上分析可得,块状、半块状矿石和浸染状矿石在电阻率和极化率方面有着不同的表现,前者有着极低的电阻率,而后者则表现为突出的高极化率异常。故在实际勘探中,通常需要两者配合使用,依据低阻高极化的特征来圈定矿体,取得显著的效果。当然,在异常的解译中,还需要考虑排除磁铁矿以及含碳围岩的强干扰作用。

综上,基于岩浆型铜镍硫化物岩矿体所体现出的高密度、高磁化率、高极化率和低电阻率的“三高一低”特征,对“重-磁-电”等勘探手段在岩浆型铜镍矿中运用的有效性进行考量,分析得出每种方法相应的可能干扰因素,认为重磁同源可以很好地圈定含矿的镁铁质-超镁铁质岩体,而低阻高极化特征能够精确刻画硫化物矿体在岩体中的赋存位置,有机结合,综合考虑,能够较好地应用于勘探研究,指导工程布置。但是,这只是从最理想化的物性角度来考虑铜镍矿体勘探,不同矿区含矿岩体分异程度的不同、岩体类型与产状的不同、蚀变程度的不一、含矿性的差异等地质因素都会影响铜镍矿床的物探解译工作。下面以结构复杂,但非常普遍

的北疆地区造山带型铜镍矿体作为研究对象,分析论证其特点以及在地球物理勘探过程中需要考虑的地质因素。

## 2 造山带中铜镍矿的“小岩体”特征及勘探难题

Naldrett (2004) 根据岩浆硫化物矿床产出的大地构造环境将其划分为绿岩带型、大陆边缘裂谷型、克拉通型、活动造山带型(阿拉斯加岛弧型)矿床。在国内,汤中立等(2007)将之归纳为:

(1) 古大陆边缘局部裂陷构造背景下,与大陆裂解有关的小侵入体矿床。

(2) 碰撞造山弛张裂陷构造背景下,与碰撞后张裂相关的小侵入体矿床。

(3) 古大陆边缘裂谷构造背景下,与大陆溢流玄武岩有关的小侵入体矿床。

其中,造山带中小型镁铁质-超镁铁质岩石产出大型铜镍矿是北疆地区铜镍矿成矿的显著特色,具有特殊性。该区域分布有众多的镁铁质-超镁铁质岩体,成矿潜力巨大,并且新发现一系列铜镍矿床,成矿研究逐步深入,同时又积累了丰富的地球物理资料,是研究造山带中铜镍硫化物矿床成矿特征与地球物理响应耦合关系的绝佳区域。

造山带中铜镍矿床同样具有“三高一低”的物性特征,但是由于其属于“小岩体成大矿”的范畴,含矿岩体规模小,多阶段侵入,岩相分带清楚,成群成带分布(秦克章等, 2012),具有一定的特殊性和复杂性,对传统的勘探手段提出很大挑战。相较于矿石矿物的物性差异,矿区内含矿岩体的规模、岩体形态、矿体形态、矿化类型、矿体赋存部位、岩矿体顶、底板的不同以及围岩类型的差异等,对矿区地球物理勘探工作成果的精刻画起着决定性作用,而这也正是进一步开展勘探、开采工作所关注的重心,了解它们之间内在的联系和相互关系,是正确解释勘探结果的基础。表 2 即收集部分岩浆型铜镍硫化物矿床的相关地质背景及地球物理特征,以东天山造山带中铜镍矿为主,还包括喀拉通克、红旗岭、金川岩体群,国外的 Noril'sk-Talnakh 和 Voisey's Bay 铜镍矿和陨石撞击成因的 Sudbury 铜镍矿作为对比,用来分析传统地球物理勘探在这类矿床中运用的复杂性,以及所遇到的实际困难和勘探难题。

### 2.1 岩体规模小,形态各异

造山带中铜镍硫化物矿床最大的特点就是岩体规模小,褶皱、断裂构造发育,成矿空间有限,岩体形态与产状复杂,故它不同于 Sudbury 铜镍矿的韵律层状岩体,大多存在多期次的岩浆侵位过程,导致岩体形态各异,如透镜状、脉状、菱形、葫芦状、歪斜漏斗状等,而且与围岩存在复杂的穿插、残留关系,给运用物探方法圈定岩体的形状带来不小的难度。对于重力和磁法勘探来说,在区域性的范围内小岩体往往因为异常值小而被忽略。另外,从岩体-矿体的分布结构形式考虑,无论是岩体群与小岩体矿床形式(如金川、红旗岭、喀拉通克)、大面积溢流玄武岩与侵入小岩体形式(如白马寨、Noril'sk 矿床),还是一个或几个大岩体与附近小岩体矿床形式(如 Voisey's Bay 矿床),区域上总是有性质相似的岩体群或大岩体的存在,使得重磁的背景值处在一个较高的水平,想要在其中圈定出对应于小岩体的微弱异常,对勘探精

度提出较高的要求。

图 1 中 a、b、c 分别为东天山地区黄山-镜儿泉镁铁质-超镁铁质岩带,加拿大 Sudbury 地区和俄罗斯 Noril'sk 地区的航磁等值线平面图,三者均为世界著名的铜镍成矿区,区域面积相当,比例尺较为一致,具有很强的可比性。图 b 中的 Sudbury 地区有着很高的磁场背景值(2000 nT),在其主要成矿区带上,磁场梯度变化显著,磁力线密集,具有显著的高磁异常。Noril'sk 矿区的磁场背景值则相对较低,磁力线的形态主要受区域上大面积分布的西伯利亚溢流玄武岩控制,局部的高磁异常(160~400 nT)则与含浸染状、块状硫化物的侵入体相对应,但是区域内 Noril'sk-Kharayelakhsky 深大断裂的特征在图中体现的不甚明显。而在北疆东天山地区黄山-镜儿泉镁铁-超镁铁岩带上,由于含铜镍硫化物的侵入体规模较小、岩矿体形态各异,导致区域上的高磁异常均位于铜镍矿体的北侧,推测可能与石炭系火山活动相关。而且区域内的磁场主要受到康古尔-黄山深大断裂的控制,具有明显的磁场梯度带,断裂南侧主要为正异常,北侧为负异常,不同于 Noril'sk 地区的特征,可能是由于该断裂属于多次序、多级别的巨型韧性剪切带,导致形成一条宽度厚大、结构复杂的巨型构造带所致。

### 2.2 成矿类型不同,多期次侵入

由于岩体小,矿体相对大而且富,故其不可能从小岩体自身结晶分异而来,汤中立等(2011)汤中立(1996b)认为岩体就位过程中,在深部达到硫化物饱和,于中间岩浆房发生熔离作用和部分结晶作用,分异为不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆,然后对容矿空间进行上侵贯入成矿,依据含矿岩浆进入现存空间的方式可分为复式贯入成矿,单式贯入成矿,脉动式贯入成矿和反向复式贯入成矿。

不同的成矿类型,使得相应的地球物理响应也不尽相同。红旗岭铜镍矿 1 号岩体属于贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆的复式贯入,而 3 号岩体是由贫矿岩浆贯入聚集成矿,星点状矿石赋存于盆状岩体底部,7 号岩体为富矿岩浆贯入成矿,基本全部由海绵陨铁矿石组成,属于单式贯入成矿,故在 7 号岩体上方有着极强的磁异常(4000 nT),形态特征明显,而近年来 3 号岩体深部探矿工作的突破与其单式贯入成因也不无关系;图拉尔根铜镍矿则属于单次脉动式贯入,虽相比红旗岭 7 号岩体略微复杂,但岩矿体间的关系较为明晰,与物探异常取得较好的耦合关系,也是其勘探工作取得快速突破的原因之一。但是,东天山地区铜镍矿绝大多数属于复式贯入成矿(苏本勋等, 2009),比如黄山、黄山东、香山等,其表现为不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆分别多次贯入相同或相近的成矿空间,使得岩矿体的空间分布特征复杂化,矿体形态各异,运用传统地球物理方法很难进行精确厘定。

### 2.3 围岩成分复杂,大多受碳质干扰

东天山造山带中的铜镍矿带和喀拉通克岩体群均显示出钙碱系列而非拉斑系列的演化趋势,成矿时代集中在 278.6~284 Ma(Qin *et al.*, 2011),均为早二叠世,虽矿床的成因机制仍存在争议,但不可否认的是其与碰撞造山期后的地壳伸展有密切关系,所以侵入的围岩多为前期俯冲增生阶段相关的泥盆系-石炭系沉凝灰岩、碳质页岩、火山碎屑岩,

表 2 典型铜镍硫化物矿床的岩体、矿化、围岩和地球物理特征  
Table 2 Rocks, mineralization, wall rock and geophysical characteristics of typical magmatic Cu-Ni sulfide deposits

铜镍硫化物矿床	岩体规模 (矿床规模)	岩体形态	矿体形态	岩体-矿体的分布结构形式	成矿类型	矿化类型	矿体赋存部位	围岩类型	目前勘探深度及岩体的顶底板	地球物理特征	资料来源
Sudbury	60 km × 30 km (超大型)	盆状	脉状, 透镜像状	大岩体与附近小岩体	陨石撞击-原地重熔	块状为主, 浸染状次之	岩盆底部接触带中, 底部港湾处以及岩体周边闪长岩岩枝	花岗岩、片麻岩、硬砂岩、角砾岩	开采深度 2 km, 已发现最深矿体 2430 m. 盆状岩体中心底板为 5 km, 南侧可向下延伸至 10 km (地震勘探结果)	地面磁异常在 2000 ~ 3500 nT 范围内变化, 最高可达 4000 nT	Lightfoot and Naldrett, 1994; 汤中立, 1992; 汤中立等 2011
Noril'sk-Talnakh	3~6 km <sup>3</sup> (超大型)	岩席	似层状, 透镜像状	大面积溢流玄武岩与侵入小岩体	通道式成矿	块状, 浸染状, 脉状	侵入体底部为块状, 上部为浸染状	蒸发岩, 碳酸盐岩, 泥盆系-石炭系陆相沉积岩	开采深度达到 1200 m, 已发现 1800 m 深矿体	与矿体相关航磁异常为 160 nT 左右, 区域重力异常 1.3 mGal	Lightfoot and Naldrett, 1994; 罗照华等, 2000; 汤中立, 1992; 严加永等, 2008
Voisey's Bay	约 3 km × 2 km (超大型)	脉状	透镜像, 豆荚状, 脉状	大岩体与附近小岩体	通道式成矿	块状, 网脉状为主, 浸染状次之	补给岩墙内部和临近补给岩墙入口处	Nain 火成岩系, 花岗岩, 斜长岩, 片麻岩	顶板出露地表, 底板一直向下倾斜延伸, 勘探深度达到 2000 m 以上	区域性航磁异常与矿体并不完全吻合	Li <i>et al.</i> , 2001; 高辉等, 2009; Balch <i>et al.</i> , 1998
金川	1.34 km <sup>2</sup> (超大型)	岩墙状	似层状, 透镜像, 脉状	岩体群与小岩体	深熔复式贯入	星点状、海绵陨铁、块状为主, 浸染状次之	4 个矿区, 1 号矿体位于岩体中心, 24 号矿体产于岩体中下部	古元古界白家咀子组片麻岩、混合岩、大理岩	勘探深度已达到 1200 m, 岩体出露, 底板向下延伸可达 1000 m	出露岩体上方磁异常 > 3500 nT, 剩余重力异常 0.45 mGal, 极化率大于 12%~18%	汤中立, 1992, 1996b; 汤中立等, 2007; 付开泉和李百祥, 2006; 文美兰和罗先榕, 2013
红旗岭	1 号岩体长 980 m, 宽 150 ~ 280 m; 7 号岩体长 750 m (大型)	1 号透镜像; 7 号岩墙状; 3 号岩盆状	似层状为主, 脉状矿体	岩体群与小岩体	深熔-单式贯入	浸染状, 斑点状, 海绵陨铁、块状	1 号岩体为上悬矿体; 7 号岩体为纯硫化物脉体贯入; 3 号岩体深部有层状矿体	寒武系-奥陶系呼兰群变质岩, 片麻岩、角闪岩、云母片岩、大理岩	3 号岩体 724~1068 m 见矿; 1 号岩体地表出露, 底板深为 500 m	含矿岩体电阻为 100~300 Ωm; 地面磁异常的变化范围 2000~3000 nT, 最高可达 4000 nT	杨学立, 2012; 董耀松, 2003; 汤中立, 1996a; 徐贵东等, 2010
白马寨	长 190 m, 宽 47 m (中型)	扁柱体	扁柱体	大面积溢流玄武岩与侵入小岩体	深熔-脉冲式贯入	稀疏浸染状, 海绵陨铁、块状矿石	岩体中心部位	下奥陶统砂、板岩及其互层	目前勘探深度为 750 m 左右, 底板未打穿		汤中立等, 2007; 宋立军和朱杰勇, 2004
喀拉通克	0.075 km <sup>2</sup> (大型)	1 号岩体漏斗状, 2、3 号岩体扁豆状	不规则透镜像, 巢状, 似层状	岩体群与小岩体	深熔-复式贯入	块状, 海绵陨铁, 稠密浸染状为主, 稀疏浸染状次之	1 号矿体位于 1 号岩体中心, 2、3 号矿体位于 1 号岩体中、下部	沉凝灰岩, 碳质沉凝灰岩, 凝灰质碳质泥板岩	目前勘探深度为 700~800 m 左右, 2 号岩体底部新发现超基性岩石	1 号岩体地面磁异常为 200 nT, 2、3 号隐伏岩体为 50 nT, 剩余重力异常 0.1~0.2 mGal	秦克章等, 2012, 2014

续表 2

Continued Table 2

铜镍硫化物矿床	岩体规模(矿床规模)	岩体形态	矿体形态	岩体-矿体的分布结构形式	成矿类型	矿化类型	矿体赋存部位	围岩类型	目前勘探深度及岩体的顶底板	地球物理特征	资料来源
黄山东	2.8 km <sup>2</sup> (大型)	菱形	透镜状, 长条状	岩体群与小岩体	深熔-复式贯入	稠密、中等浸染状为主, 块状、稀疏浸染状次之	主要为底部矿体, 部分为上悬矿, 贯入型脉状矿体主要产于地表	石英系浅变质粉砂岩、细砂岩、千糜岩化沉凝灰岩, 含碳粉砂、灰岩板岩等	勘探深度达到 1000 m 以上, 杂岩体出露地表, 向下延伸达 700~1000 m, 其中 600~800 m 段有大规模含矿超基性岩体	航磁异常 100 nT 左右, 地面磁异常则在 200 nT 左右, 最大值 > 1200 nT, 极化率最高达 25%, 含矿岩体电阻率范围 100~500 Ωm	秦克章等, 2012; 毛亚晶等, 2014; 邵行来, 2012; 新疆六大队地质报告, 1987
葫芦	0.75 km <sup>2</sup> (大型)	葫芦状	似层状, 透镜状	岩体群与小岩体	深熔-复式贯入	稀疏浸染稠密浸染	超镁铁质杂岩体的中下部和底部	下石炭统玄武岩, 细碧岩, 角斑岩, 凝灰岩, 硅质岩等, 部分含碳质片岩	3 号矿体为地表出露, 其余矿体埋深 350~400 m 左右	航磁异常为 500 nT, 地表电磁为 1000 nT 左右, 含矿岩体电阻率一般小于 200 Ωm, 极化率最高可达 16.8%	夏明哲等, 2008; 秦克章等, 2012; 邵行来, 2012; 邵行来等 2010
白石泉	1.8 km <sup>2</sup> (大型)	边部向内陡倾, 中间突起的“W”型岩盆	透镜状, 脉状	岩体群与小岩体	深熔-复式贯入	星点、稀疏浸染、中等浸染、海绵陨铁、半块状	地表矿和浅层矿 (80~150 m) 为主, 呈厚层底状	片麻状花岗岩, 糜棱岩化花岗岩, 变粒岩, 黑云母石英片岩, 混合岩	勘探深度达 700~850 m 左右	区域性磁异常为 300~500 nT, 最高可达 1000 nT 以上, 剩余重力异常最高位 2 mGal, 富矿体电阻率 100 Ωm 左右	吴华等, 2006; 柴凤梅等, 2007; 秦克章等, 2012
香山	2.9 km <sup>2</sup> (中型)	透镜状, 雁列状	长条状, 局部囊状	岩体群与小岩体	深熔-脉动式贯入	中等稠密浸染状为主, 块矿次之	产于两种岩性接触带或构造裂隙内, 以及下部超基性岩中	下石炭统中酸性火山碎屑岩	勘探深度在 700 m 左右, 矿体赋存标高一般为 600~800 m 之间, 最大延伸到 1100 m	航磁异常面状分布, 地面磁测异常为 1000~2000 nT, 极化率 10%~15%, 视电阻率 100~300 Ωm	秦克章等, 2012; 肖庆华等, 2010
图拉尔根	0.004 km <sup>2</sup> (大型)	透镜状, 脉状	透镜状, 似层状, 脉状	小岩体	深熔-脉动式贯入	稀疏稠密浸染, 部分特富矿	特富矿与块状矿呈板状产于岩体中上部	泥盆系-中上石炭统火山碎屑岩, 含角砾晶屑凝灰岩	岩体北东段出露地表, 南西段隐伏岩体顶板埋深 110~541 m, 底板埋深在 400~720 m	航磁异常为 80~85 nT, 北东段磁异常最大为 1750 nT, 剩余重力异常为 1.74 mGal, 南西段则分别为 100~200 nT, 0.1~0.2 mGal, 电阻率小于 300 Ωm	三金柱等, 2007; 惠卫东等, 2011; 邵行来, 2012; 秦克章等, 2012; 肖崎彬等, 2005



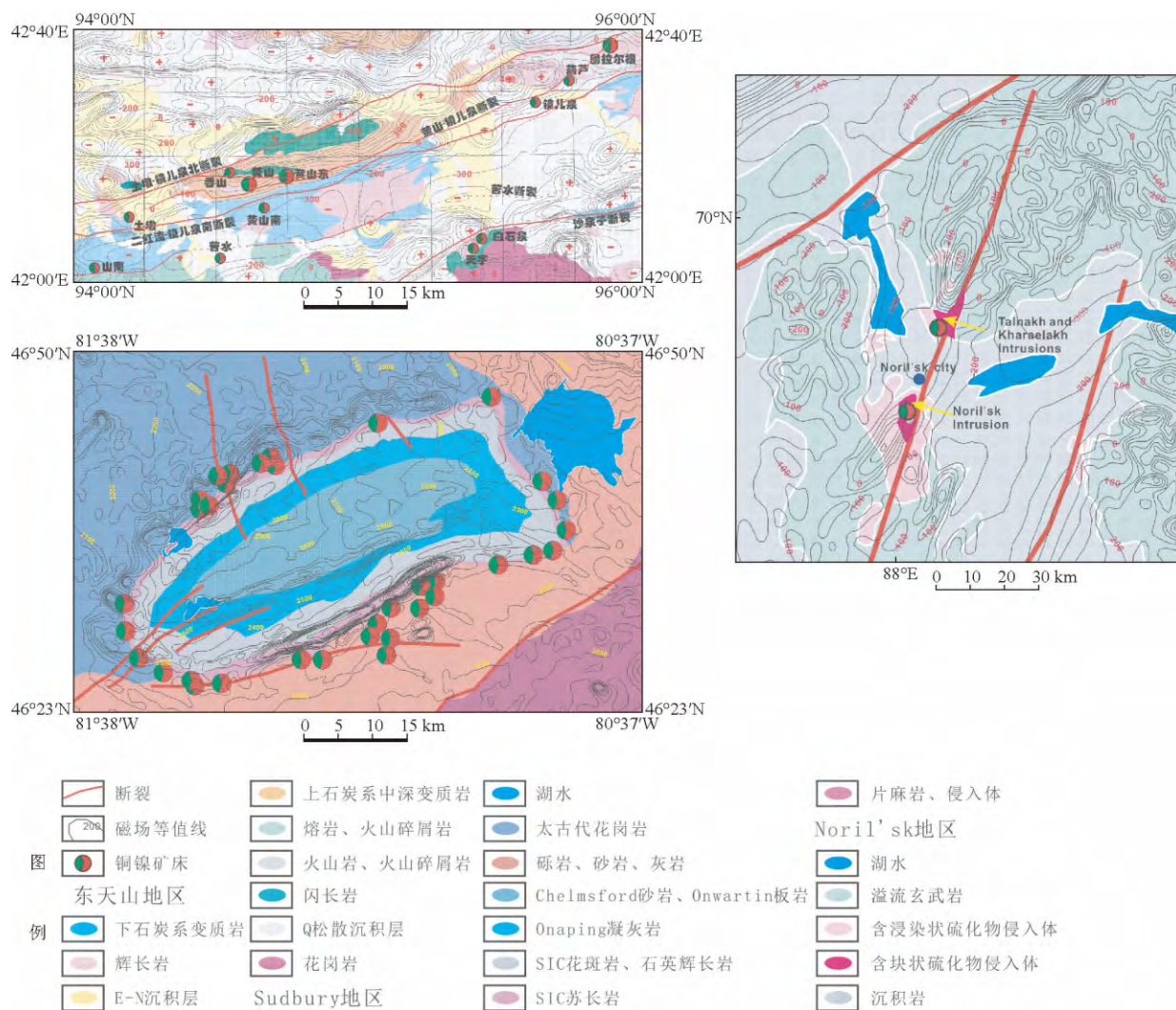


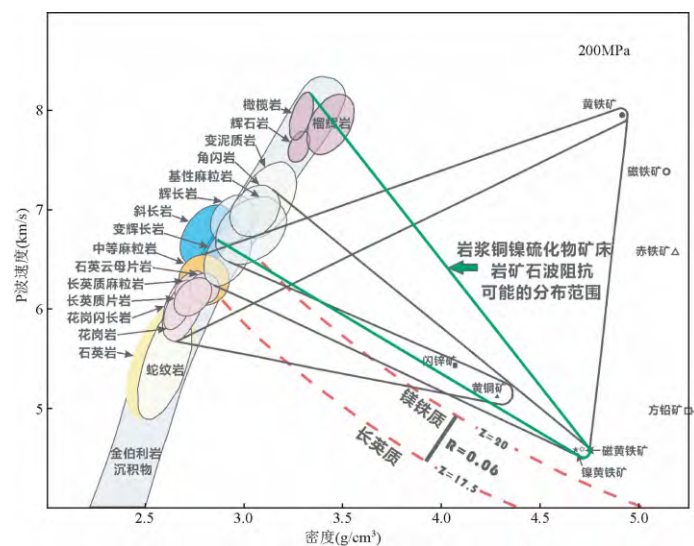
图1 典型铜镍矿集区的航磁等值线平面图

(a) 东天山东段, 据惠卫东等, 2011; (b) Sudbury 地区, 据 Hearst *et al.*, 1994; (c) Noril'sk 地区, 据 Rempel, 1994.

Fig. 1 Aeromagnetic survey isoline map of typical Cu-Ni ore-concentrated area

(a) east section of Eastern Tianshan, from Hui Weidong, 2011;

(b) Sudbury area, from Hearst, 1994; (c) Noril'sk area, from Rempel, 1994.

图2 常见结晶岩石和矿石的波阻抗特性(据 Malehmir *et al.*, 2014)Fig. 2 Acoustic properties of most common crystalline rocks and ores(from Malehmir *et al.*, 2014)



如喀拉通克、黄山东、葫芦、香山、图拉尔根等铜镍矿床,而不同于金川和红旗岭的古老变质岩。而沉凝灰岩、碳质页岩、火山碎屑岩的组成并不稳定,其成分变化范围很大,故导致其密度、磁化率、电阻率等物理性质也有着很大的差异性,从而铜镍硫化物矿体在其中的表现也不尽相同。如黄山东岩体地面磁法异常很弱(200 nT,见表2),主要含矿岩相辉长岩也表现为弱磁性,但其在航磁中有着明显的异常(也为200 nT,见表2),主要是源于围岩的磁性很弱,从而突出了黄山东岩体。而同处于黄山—镜儿泉超镁铁岩带的图拉尔根岩体则正好相反,航磁异常几乎没有,地面磁法异常达到4463 nT,这主要是因为围岩中安山质、角斑质火山岩的磁性较强,而图拉尔根岩体的磁异常被淹没在其中(邵行来,2012)。另一方面,区域内喀拉通克、黄山东、葫芦等矿区的围岩中含有碳质,使得电法勘探中的低阻体并不一定对应铜镍矿体,更多的可能为含碳地层,给地球物理勘探的解译工作带来极大的干扰。

因此,在该区域开展地球物理勘探时,受围岩物性变化较大以及含碳地层的影响,铜镍矿床并不完全体现出“三高—低”的特点,勘探工作需要建立在对区域围岩物性充分了解的基础上,针对具体矿床展开具体分析,才能更加客观准确。

#### 2.4 矿体形态、矿化类型多样,赋存位置深浅不一

铜镍硫化物矿体的形态、赋存位置和矿化类型的差异对地球物理测量结果有着极大的影响。区域内矿体在规模较大的岩体中主要表现为似层状、透镜状,而在复式贯入的小岩体中则形态各异,呈透镜状、似层状、盆状、长条状、囊状、巢状等(秦克章等,2012),并无规律可循。然而,电磁测深勘探数据的处理和正反演多数都是基于平板状低阻体这一假设的,故现实情况下铜镍硫化物矿体形态越复杂,越偏离平板状,得到的解译结果就越不可信。

岩矿石的矿化类型多样化,如稀疏、中等、稠密浸染、海绵隙铁状、半块状、块状等,同一成分不同矿化类型的岩石,物理性质差异很大,对应的物探响应也不尽相同,如喀拉通克Y2岩体底部以稠密浸染状矿化为主,Y3岩体底部则以稀疏浸染状为主,其余地质条件大致相同,但两者在地表所体现的重力异常相差一倍左右。

地表测得的地球物理异常的强弱还取决于矿体的赋存位置,埋深越浅,甚至直接出露到地表,异常越强。金川矿区的岩体和矿体同时出露地表时,磁异常呈锯齿状多峰值,可达2000~4000 nT;而岩体出露,矿体埋深200~300 m时,磁异常曲线变宽,峰值减少至1000~2000 nT,有可能无法检测到矿致异常;若地表有覆盖层,则磁异常进一步减弱(付开泉和李百祥,2006)。而造山带中铜镍硫化物矿床矿体的赋存位置多种多样,部分属于上悬矿,有些位于岩体的底部,还有的受岩体构造控制呈透镜状,没有大致的规律性,给地球物理的解译工作提出难题。

#### 2.5 常规物探方法难以满足“勘探深度大”的要求

岩浆型铜镍矿产于镁铁质—超镁铁质岩石中,成矿物质来源于上地幔甚至软流圈、下地幔,岩矿体的赋存严格受到区域上深大断裂的控制,所以理论上矿体的赋存深度可以很深。加拿大Sudbury矿床的勘探深度已经达到2500 m(滕吉

文等,2007),最大探测赋矿深度达到4000多米,Voisey's Bay矿床也在开展2000 m以上的勘探工作,取得显著的效果。我国金川铜镍矿和红旗岭铜镍矿的勘探深度也在不断增加,已经达到1200 m,虽相对于国外仍有不小的差距,但在储量上也均有突破。而东天山铜镍成矿带和喀拉通克岩体群的勘探深度普遍在700~800 m左右(见表2),超过1000 m的钻孔还很少见,仅在黄山东个别钻孔达1500 m深,坡一矿区最深孔达2400 m,整体勘探程度亟待提高。其中,岩体顶底板的判断是指导找矿勘探的前提(秦克章等,2012),Sudbury铜镍矿床就是通过地震勘探明确岩盆状岩体的底面深度和形态,进而在底板周围发现一系列的铜镍矿体。喀拉通克矿区在先前的Y2岩体钻探工作中,于700~800 m处钻及围岩,认为已经达到岩体底部而停止打钻。最近,随着对围岩角岩化及其强度变化、地球化学特征等的研究(秦克章等,2014)以及坑内钻探工作的开展,发现其47~51线底部于700~850 m的深部出现矿化超基性岩体,推翻之前岩体底板已打穿的判断,从而极大地开拓深部找矿空间。

可见区域内大多数的铜镍矿床深部还存在着相当大的找矿潜力,但是,传统的勘探中重力和磁场随着深度呈二次方衰减,矿体埋深加大,其反映在地表的观测值急剧减弱,圈定和解译这些微弱的异常存在很大难度。而电法勘探能力和精度也随着勘探深度的增加而急剧下降,高密度电法的有效勘探深度在200 m以内,大地电磁测深可达到几十到上百km,但接收的自然信号微弱,抗干扰能力差,分辨率较低(叶益信等,2011)。广泛应用的EH-4和CSAMT效果介于二者之间,理论上勘探深度分别为1000 m和2000 m以上,但实际工作中的有效深度在700~1000 m之间(曹令敏,2010),但仍无法满足铜镍矿深部勘探的要求。同时,这类方法还存在着近区效应、电磁干扰、静态效应等问题。

综上,东天山造山带中铜镍硫化物矿床和阿尔泰造山带南缘喀拉通克岩体群具有“小岩体成大矿”的典型特征,在传统的“三高—低”物性差异之上,考虑岩体形态、规模、矿体形态、矿石类型、赋存部位等地质因素,其特殊性和复杂性可归纳如下:

(1)岩体规模小,形态复杂,多侵入于岩体群或大的中性岩体之中,难以精确圈定,要求较高精度的地球物理勘探。

(2)岩浆熔体和矿浆的贯入方式各异,单式贯入的小岩体结构相对简单,利于勘探,而复式贯入使得岩体和矿体的空间分布复杂化,难以清晰厘定。

(3)侵入围岩多为沉凝灰岩和火山碎屑岩,成分不一,物性范围较大,使得矿体并不一定体现“三高—低”的特点,而且部分围岩中含碳质,对电法勘探造成极大干扰。

(4)铜镍硫化物矿体形态不规则,传统的解译方法并不完全适用,矿化类型多样,赋存位置和埋藏深度不一,使得对应的地球物理响应纷繁复杂。

(5)矿床的勘探深度不足,深部具有很大的找矿空间,但传统地球物理勘探手段受限于原理缺陷和仪器功能,其勘探能力和精度随深度增加而急剧下降。

鉴于东天山造山带中铜镍矿和阿尔泰造山带喀拉通克岩体群因“小岩体成大矿”而表现出的特殊性和复杂性,以往基于“三高—低”物性异常而建立起来的“重—磁—电”常规地

球物理勘探方法,已逐渐无法满足深部探矿和精确圈定矿体的勘探要求,需要转换思路,独辟蹊径,探索能够简单有效地圈定深部隐伏硫化物矿体的勘探技术方法,并付诸勘探实践,在实践中检验其有效性,进而改进提升。

### 3 铜镍硫化物矿床勘探的新思路与新方法

随着地球物理勘探技术的不断发展和铜镍硫化物矿床地质研究的持续深入,在铜镍矿传统的“重-磁-电”勘探方法之上,又涌现出很多新颖、有效而且准确度大大提高的地球物理勘探手段,如高分辨率浅层地震勘探、地-井 TEM 勘探、井中重力勘探以及航空电磁勘探。这些方法在新一轮的岩浆型铜镍硫化物矿床勘探中发挥着重要作用,极大地提高深部勘探能力和精度,并取得一系列显著的勘探成果。

#### 3.1 高分辨率浅层地震勘探

虽然在人们的传统意识当中,地震勘探并不适用于硬结晶岩地区以及复杂的金属矿勘探之中,但是相比于重、磁、电法勘探,其具有精度高、探测深度大、分辨率高和结果可靠的特点,可以弥补传统非地震勘探方法在寻找深部隐伏矿体方面的理论缺陷和不足(勾丽敏等,2007; Malehmir *et al.*, 2014),故在铜镍矿的勘探中发挥着日益重要的作用。

首先,从浅层地震反射波勘探的理论基础来考量,最基本的问题便是金属硫化物矿体与围岩间是否存在显著的波阻抗差异,使其能够产生强度足够的、能被地表仪器接收的反射波,与此同时为了达到高分辨率,还需要兼顾考虑矿体的宽度、形态等影响因素。Salisbury 等(1996, 2000, 2003)总结出运用反射地震波直接勘探金属矿体需要满足的三个条件:

1) 矿体的波阻抗必须显著地大于围岩的波阻抗,产生有效的反射系数  $R(>0.06)$

$$R = \frac{Z_o - Z_h}{Z_o + Z_h} = \frac{V_{Po}\rho_o - V_{Ph}\rho_h}{V_{Po}\rho_o + V_{Ph}\rho_h}, \quad (1)$$

其中  $Z_o$ 、 $V_{Po}$ 、 $\rho_o$  分别代表矿石的波阻抗、P 波速度和密度,  $Z_h$ 、 $V_{Ph}$ 、 $\rho_h$  则代表着容矿围岩的波阻抗、P 波速度和密度。一般情况下,波阻抗之差达到  $2.5 \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$  时,即可得到有效的反射系数  $R$ ,从而形成明显的地震反射波(Salisbury *et al.*, 1996; Salisbury and Snyder, 2007)。早在 20 世纪 60 年代, Birch(1960)已经系统研究岩石横波速度、纵波速度随压力的变化,认为随着压力增加,横波速度由于岩石内部空隙的闭合而快速增加,直至 200 MPa(相当于地下 6 km)后保持稳定不变(Salisbury *et al.*, 2003)。90 年代,为了研究地震方法在金属矿勘探中的适用性,Salisbury 等(1996)即在 200 MPa 的条件下测定来自加拿大 Sudbury、Kidd Creek 以及 Les Mines Selbaie 矿区已知成分岩石的密度和地震 P 波速度,其中包含常见的围岩、块状硫化物矿石以及成分介于二者之间的岩石。结果表明:常见围岩,从未固结沉积物—长英质—镁铁质岩石均位于 Nafe-Drake 曲线上,且速度和密度随岩石镁铁质的增加而增加;而块状硫化物由于密度高位,于曲线右侧较宽的密度-波速区域范围内,分别以黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿以及黄铜矿为端元,有着明显差异,其中黄铁矿的波速最高,磁黄铁矿最低;成分介于其中的岩石,其波速和密度为两端元的线性组合。对于绝大多数的围岩和硫化物

矿体来说,两者的波阻抗差异能够满足有效反射系数的要求,地震波可以发生反射,甚至是强反射。Milkereit 等(2000)在 Sudbury, Malehmir 等(2012)在 Kevitsa 铜镍矿也开展相同的工作,所得结果基本一致。图 2 即为 Malehmir 等(2014)总结得出常见岩石和矿石的波阻抗性质,可以指导各种类型金属矿床的地震勘探工作。其中两条虚线分别代表常见的长英质和镁铁质岩石,两者差异达到  $2.5 \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ ,也可以形成有效的地震反射波,而绿色线框圈定的则是岩浆铜镍硫化物矿床岩石波阻抗的可能分布范围。

2) 矿体必须足够大使得其能够被地震波所探测到。理想状态下,矿体的直径应该达到地震波一个波长的程度才能够被探测到。实际情况中,在给定深度  $Z$  处水平矿体能够被地震波识别出的最小的直径为

$$d = \sqrt{2Zv/f}. \quad (2)$$

而且矿体的厚度也必须大于地震波长的  $1/4$ 。因此,通常情况下认为,位于 1000 m 深度处的目标矿体如果厚度小于 20 m,长度小于 350 m,将很难被地震波直接探测到(Malehmir *et al.*, 2012)。

3) 矿体必须能够反射足够多的地震波能量。类似于光的反射,缓倾斜的矿体能够将能量反射回地面,而陡倾斜的矿体则会将地震波能量向下发射。通常情况下,如果矿体的倾角大于  $60^\circ$ ,则在地表的地震勘探工作将很难进行下去。

结合以上的情况可知,只有当块状铜镍硫化物矿体满足上述条件,有足够的厚度和延伸,连续的缓倾斜,才能在地震反射波勘探中得到有效的识别。

诚然,这样的条件较为苛刻,但是,随着地震勘探仪器设备、资料采集及处理解释方面的进步,其越来越多地运用于硫化物矿床的深部勘探中,并在很多矿区成功地圈定出深部硫化物矿体。Milkereit 和 Green(1992)以 Sudbury 铜镍矿为例,通过高分辨率地震勘探确定盘状岩体的界面及构造形态,并圈定深部块状硫化物矿体。在此基础上, Milkereit 等(2000)又在 Sudbury 地区 Trill 铜镍硫化物矿区开展三维金属矿地震勘探,建立矿区的地下物质分布模型,其中精细刻画岩体与下盘围岩的接触界面,圈定 1800 m 深度处较厚的块状硫化物矿体,并得到钻孔验证。Malehmir 等(2009b)在瑞典 Kristineberg 矿区通过地震勘探在地下 2500 m 处识别出块状硫化物矿体,并推测 4000 m 处存在大规模超基性岩体。同样,在加拿大 Halfmile 湖地区 Bathurst 矿区运用 3D 地震方法描绘出一个位于地下 1200 m 深度处的块状硫化物盲矿体(Malehmir and Bellefleur, 2009)。Malehmir 等(2012)在芬兰北部 Kevitsa 铜镍硫化物矿区,国内梁光河研究组率先在图拉尔根铜镍矿区(肖骑彬等, 2005)、白石泉铜镍矿区(吴华等, 2006)开展地震勘探工作,虽没有直接圈定矿体,但都有效地识别出容矿岩石的地质构造以及区域内复杂断层、断块,有效地指导随后的勘探工作。

而对于产状较陡的矿体,尤其是铜镍矿中的岩浆通道系统,以及近垂直断层的描述,则普遍采用井下地震勘探方法,比如侧扫声纳, VSP 和 MSP 系统(Eaton *et al.*, 1996; 勾丽敏等, 2007),其原理与地面勘探基本相同,只是将检波器放置在井中接收,使得向下反射的地震波信息得以记录下来。Snyder 等(2002)在 Sudbury 的 Norman West 矿区开展井下

地震工作,精细地描述 Sudbury 矿区火成杂岩体(SIC)钻孔附近的结构构造,并在钻孔附近发现硫化物矿体. Mueller 等(2012)在同一矿区进行井下地震研究推测距 N40 钻孔 1800 m 处存在矿体. 另外, Perozzi 等(2012)则将井中地震用于加拿大 Voisey's Bay 矿区钻孔附近 Ni 品位的评估.

另一方面,地震散射波成像或层析成像技术适用于复杂地质体的勘探,可以尝试将其运用于铜镍硫化物矿床(曹令敏, 2010),但是,相关方面研究程度还远远没有达到能够实际应用的地步. 姜枚等(2012)将地震层析成像技术运用于金川铜镍矿的勘探中,得到矿区的地震层析剖面速度图像,结合磁法和可控源音频大地电磁法,将其中的近水平透镜状高速低阻体解释为从深部上侵的以超镁铁质岩石为主体的岩浆岩,与“小岩体成大矿”理论中的中间岩浆房相对应.

### 3.2 地-井瞬变电磁三分量测量系统(地-井 TEM 系统)

“地-井瞬变电磁三分量测量系统”(地-井 TEM 系统),又称“井中电磁勘探”(Borehole ElectroMagnetic, BHEM),是岩浆硫化物矿床精细勘探的核心(Qian *et al.*, 2004),其能有效弥补航空电磁法勘探深度不够、地面电磁勘探分辨率不足的现状,快捷方便地识别出良导体,而且将勘探范围从钻孔本身的几个  $\text{cm}^2$  扩大到钻孔附近 300 m 以内均可以准确探测矿体. 同时,还可以提供关于深部良导体的位置、几何形状、大小和矿化程度等多重信息,所以自上世纪 80 年代以来逐步应用于铜镍硫化物矿床的勘探中.

地-井 TEM 系统原理如图 3 所示,在钻孔上方或附近地面上侧放置发射线圈,供以脉冲电流,从而产生激励一次电磁场,用接收探头在钻孔中逐点测量地下介质产生的感应二次场. 当发射回线的脉冲电流从峰值跃变到零时,一次场立即消失,而地下介质中的感应涡流并不立即消失,而有一个衰变过程,这个过程的特征与地下电性结构分布有关,导电性越好,衰减过程越缓慢. 故而通过研究井中感应二次场在空间和时间上的变化特征,就可以知晓钻孔周围电性分布,发现井旁、井底盲矿,或推断已见矿体的空间分布与延伸方向(张杰等, 2013).

针对地-井 TEM 系统, King(1996)采用 Multiloop 程序对于自由空间中的导体平板进行正演模拟,图 3 中钻孔未穿过矿体时,其测量剖面在矿体对应位置表现为正常,其中异常的宽度取决于矿体与钻孔间的距离,而倾角可以通过两侧峰值肩部的高度比值来近似确定,时间常数则由信号随时间衰减速率来确定. 一旦确定出地质体的有效大小和时间常数,则导体的电导值为

$$S = \frac{\tau \pi^2}{\mu_0 a}, \quad (3)$$

其中是  $\tau$  时间常数,  $a$  是有效的大小,  $\mu_0$  为  $4\pi \times 10^{-7}$ . 若钻孔已穿过矿体,则在图 3 中表现为负异常,矿体规模可以通过异常宽度来估量,用以判断和确定钻孔周围目标地质体的连续性和成矿品位. 20 世纪 80 年代,地-井 TEM 系统开始应用于 Sudbury 矿区的铜镍矿勘探工作中,取得显著的成果,发现 Victor 主矿体(680 Mt)和深部埋深 2400 m 的底板矿(420 Mt)(严加永等, 2008),随后又勘探出埋深 1000 ~ 1500 m 的底板矿(680 Mt). 不过,造山带中铜镍硫化物矿体存在着反复的穿插关系,空间结构复杂而多样,采用地-井

TEM 系统勘探时,需要细致的观测,反复正反演模拟,才能得到精确的解释.

由于区域性的以及局部的地质噪声干扰,加之多重导体复杂的几何形态,使得对于地-井 TEM 系统测量数据的解释更多的是基于工作人员的个人经验而非正演模型和反演算法. Qian 等(2004)在 Quebec 地区北部 Louvicourt 矿区开展地-井 TEM 勘探,发现其中存在两类较大的地质噪声干扰:已存在的 Louvicourt 矿体的干扰(衰减较慢,对应于较长的波长)和硫化物细脉(尖峰值)的干扰,均对最后的数据解释有着极大的影响. 必须详细分析数据的衰减特性,有效剔除两类地质噪声的干扰,才能得出较为合理的地质解释结果.

地-井 TEM 系统的特点是勘测深度大(一般取决于钻孔深度),井中接收,受覆盖层和外部电磁干扰小,勘探半径大(250 ~ 300 m),能准确地反映良导体的空间分布状态和规模等几何参数,在铜镍矿的勘探中发挥着日益重要的作用. 但是,仍需详细研究可能存在的干扰因素,加深正演模拟和反演算法的研究程度,从而能够更好地解释地-井 TEM 系统所测得的数据,有利于铜镍矿的深部勘探工作.

### 3.3 井中重力勘探

井中重力(Borehole Gravity)是将地面重力测量转移到钻孔中测量的一种古老的勘探方式, Smith(1950)探讨了井中重力勘探的可能性, LaCoste & Romberg 公司随后开始尝试研发井中重力勘探仪器,在 70 年代得到完善并将其运用到石油勘探之中,在油气储层探测和评价中发挥着重要作用(王宝仁等, 1993; 曹辉, 2004). 但是,其较大的直径以及粗糙的自动水平能力一直限制其运用于金属矿较小直径的钻孔中,直到最近相关技术取得突破,才使得金属矿的井中重力勘探技术日臻成熟,开始进入商业化阶段(Seigel *et al.*, 2007).

井中重力测量的原理与地面高精度重力测量相似,都是测量重力加速度的垂直变化,只是井中重力被限制在地面以下钻孔中的垂直方向,通过在井中一系列测点上停放仪器进行测量、读数,从而获得不同深度上的重力值(如图 4). 钻孔中所测得的重力值需要进行合理的校正,包括深度校正,纬度校正,气压校正,重力偏移校正以及潮汐校正,同时还应考虑地形以及地下坑道等的影响(Nind *et al.*, 2007).

实际测量时,仪器置于近似水平地层的界面,故可利用水平地层重力效应的基本公式来讨论井中重力勘探中的重力响应(Seigel *et al.*, 2007);若距离为  $\Delta Z$  的两测量点之间的重力差值为  $\Delta g$ ,则两测点间地层的视密度为

$$\rho = \frac{-1}{4\pi G} \cdot \frac{\Delta g}{\Delta Z}. \quad (4)$$

若测点间为水平均匀地层时,则上式给出的是该地层的实际密度. 由于重力具有累积效应,不受距离的限制,故井中重力测量得出的密度值理论上是从钻孔延伸到无限远处物质分布引起的平均密度值,但一般认为测得的密度值实际上是五倍垂直距离范围内的地层的平均单位体积密度. 故井中重力勘探具有与地-井 TEM 系统相同的遥测功能,可以提供钻孔内自身的密度垂向分布以及钻孔周围岩体的密度分布. 并且,井中重力测量可以在接近,甚至进入进入矿体时进行测量,对发现深部微小重力异常比地面重力勘探更具优越性,

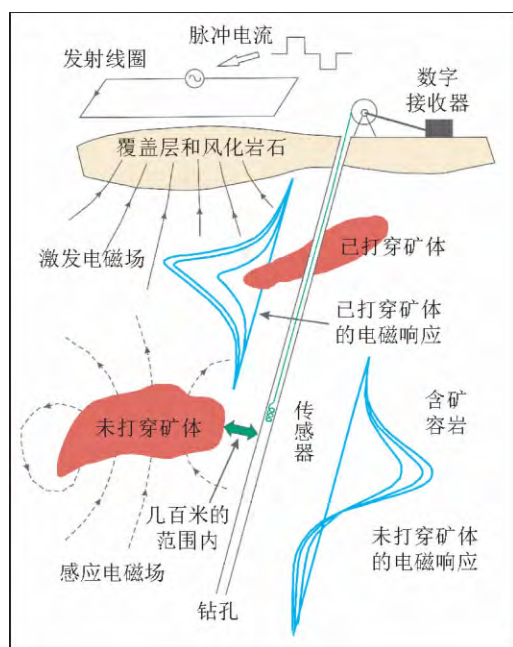


图3 BHEM系统的工作原理及钻孔穿过和未穿过矿体所产生的地球物理响应  
(据 King, 1996)

Fig. 3 Schematic diagram of a BHEM system and the geophysical response of an intersected conductor and an off-hole conductor  
(from King, 1996)

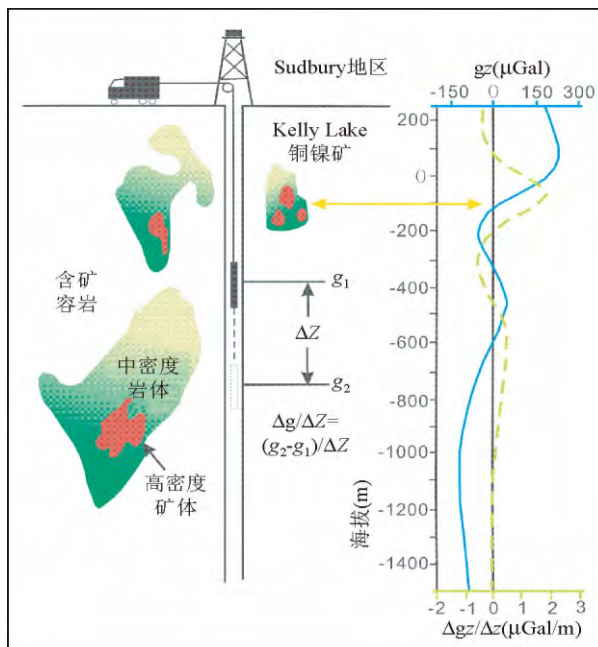


图4 井中重力勘探的工作原理及其在 Sudbury 地区 Kelly Lake 铜镍矿的应用  
(据 Nind *et al.*, 2007)

Fig. 4 Schematic diagram of a borehole gravity system and its application in the Kelly Lake Ni-Cu deposit in the Sudbury mining camp  
(from Nind *et al.*, 2007)

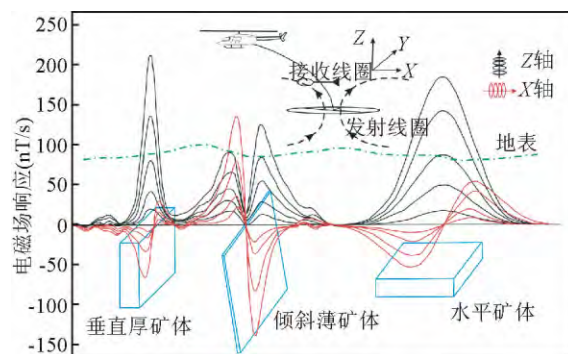


图5 直升机时间域航空电磁勘探系统的原理示意图及垂直厚矿体、陡倾斜薄矿体和水平矿体在 X 轴和 Z 轴方向上的电磁响应(据 Balch *et al.*, 2003)

Fig. 5 Schematic diagram of Helicopter-borne time-domain systems and the electromagnetic response from a thick vertical conductor, a thin steeply dipping conductor and a horizontal conductor in X-axis and Z-axis coil (from Balch *et al.*, 2003)

精度越高,故主要运用于铜镍矿隐伏矿体的勘探。

若钻孔旁侧存在未被穿过的高密度硫化物矿体时,测量所得的垂向重力异常值在矿体中心上部会增大,下部会减小;其与零值的交叉点大致对应于矿化中心的深度,还可以通过两个峰值间的距离来估计矿体中心与钻孔的距离(Nind *et al.*, 2007)。图4中 Sudbury 矿区 Kelly Lake 的铜镍矿钻孔 300 m 位置处即体现出这样的特征,同时垂向重力异常梯度值( $\Delta g/\Delta z$ )表现为高密度正异常,暗示该钻孔 300 m 深度

处 180 m 的水平范围内有可能存在高密度矿体。若钻孔未超过矿体的中心深度,则钻孔底部垂向重力异常值会体现出增加的趋势。通过这一响应,即可判断钻孔之下是否还有隐伏的矿体,从而合理确定钻孔的终孔深度,对于铜镍矿勘探中岩矿体顶底板的确定显得愈发重要。

虽然前述的地-井 TEM 系统可以高精度地刻画出钻孔及钻孔附近的低阻体,但是并不能确定其就是硫化物矿体,还有可能是围岩中不含金属的石墨层或碳质层,甚至是含水

的构造剪切带. 它们均表现出低阻的特征, 但在密度上有着很大的差异, 故井中重力探测可以弥补地-井 TEM 的不足, 从中区分出密度较大的硫化物矿体.

井中重力勘探作为地面高精度重力资料的补充, 可以减少地面重力资料解译中的多解性, 将密度分布的测量从钻孔延伸到周围岩体, 得到对硫化物矿体深度、形状的精确估计, 并从一定程度上剔除碳质围岩对地-井 TEM 系统的干扰.

### 3.4 时间域航空电磁勘探

航空电磁法 (Airborne Electromagnetic Method, AEM) 是应用电磁感应的测量原理, 以飞机为测量载体进行的地球物理勘探手段, 用以探查大地电性及磁性的变化规律, 分为频率域航空电磁和时间域航空电磁. 1950 年加拿大首先研制成功名为“INCO”的世界上第一套频率域航空电磁系统, 而第一套时间域航空电磁系统 INPUT 也于 1959 年成功问世. 由于频率域航空电磁系统通常是在几个固定频率上发射接收电磁波 ( $n \times 10^2 \text{ Hz} \sim n \times 10^4 \text{ Hz}$ ), 发射磁矩一般较小 ( $< n \times 10^3 \text{ Am}^2$ ), 导致理论勘探深度大致在 150m 左右 (李军峰, 2010; 孙东明, 2010). 相对来说, 时间域航空电磁法具有更大的勘探深度, 信息量更为丰富, 所以得到长足的发展, 在铜镍矿的勘探中发挥着越来越大的作用.

时间域航空电磁系统最初测量的是磁场的变化率, 即  $dB/dt$ , 但是考虑到铜镍硫化物极强的导电性, 感应涡流有可能在整个测量时间内都没有明显的衰减, 降低分辨能力, 从而极大地限制该方法所能探测到的硫化物矿体的电阻率范围. 20 世纪 90 年代末出现的 GEOTEM 系统开始直接测量磁场值  $B$ , 极大地提高勘探效果 (Smith and Annan, 1998; Richard *et al.*, 2002). 同时, 由于时间域航空电磁系统是运用瞬间变化的电磁场来进行观测的, 存在发射线圈激励一次场的 on-time 阶段和接受线圈接收二次感应场的 off-time 阶段. 由于 on-time 阶段发射线圈功率很大, 会覆盖微弱的二次感应场并引入大量的噪声, 所以传统意义上, 航空电磁系统一般只在 off-time 阶段进行测定. 随着研究程度的加深, 时间域航空电磁开始在 on-time 阶段也进行观测, 并通过一定手段将一次场去除, 使得整个系统更敏感于高电导率的铜镍硫化物矿体 (Balch *et al.*, 2003).

不同的大地电性结构, 感应二次场的衰减过程便有所不同, 通过测量和分析接收到的二次感应场响应, 可以确定地下的电性分布结构, 获得矿体的位置、形态、构造等信息. 由于在矿体中二次场的衰减速度很慢, 故在同一时间测得的剖面中矿体上方的二次场因衰减较慢而使其对应的测量值较大. 同时, 结合剖面中峰值的大小和对称性还可以大致判断地下对应矿体的电导率、产状和延伸. 图 5 中, 厚垂直矿体在  $Z$  轴方向上的测量值为对称的单一峰, 而在水平  $X$  轴方向上表现为小幅度的从负值向正值转换的交叉点. 水平矿体在  $Z$  轴和  $X$  轴方向的响应类似于垂直矿体, 但峰值宽度范围大. 而陡倾斜薄矿体在  $Z$  轴方向上表现为两个并不对称的峰值, 在  $X$  轴上表现为从倾斜方向的负值向正值转变的交叉点, 其幅值大小与  $Z$  轴方向上的幅值大小相一致.

时间域航空电磁法从发展之初, 就因为搭载平台的不同而分为固定翼航空电磁系统和直升机航空电磁系统. 固定翼航空电磁系统通常情况下将发射回线架设在飞机上, 而接收

机安放在吊舱内, 与飞机主体有一定的距离. 由于发射线圈是以飞机为主体建立的, 所以, 其发射磁矩很大, 相对来说则具有较大的勘探深度, 可以探测到地表以下超过 400 m 深度处的导体 (Balch *et al.*, 2010). 但是, 由于发射线圈和接受器之间有较远的间隔, 会导致矿体定位的不确定性, 使得剖面的侧向分辨率也随之降低. 直升机航空电磁系统, 相当于把整个地面时间域电磁法系统用直升飞机吊起来, 在空中进行测量 (如图 5). 由于通常情况下 on-time 阶段测量, 一次场的强度又会对二次场测量进行干扰, 所以导致该系统的发射磁矩一般较小, 对于大部分靶区而言, 勘探深度一般在 150 m 以内. 但是, 由于其发射线圈和接受线圈间的距离很近, 能够准确定位目标体的位置, 侧向分辨率较高. 故两类系统各有所长, 需结合实际的勘探要求, 选用合适的航空电磁系统.

1999 年, AeroTEM 系统横空出世, 其将固定翼系统的大穿透深度和直升机系统的高分辨率融合起来, 具有相对高的偶极矩  $4 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^2$  和 on-time 测量功能, 标志着“航空勘探直接指导钻井工作”时代的来临 (Balch *et al.*, 2010). 由于其比传统航空物探分辨率高, 勘探深度大, 相对于地面勘探又省时省力, 性价比高, 故从诞生之日起, 就广泛应用于金属矿尤其是铜镍硫化物矿床的勘探中, 如 Lac Rocher 地区的 Quebec 铜镍矿 (Richard *et al.*, 2002; Boyko, 2001), Northern Ontario 地区 McFaulds Lake 的 Eagle's Nest 和 AT-12 铜镍矿带 (Balch *et al.*, 2010) 以及 Ontario 地区的 Powerline 矿床 (Balch *et al.*, 2003).

## 4 目前存在的问题及未来发展方向

自 Sudbury 铜镍矿的发现开始, 经过 100 多年来不断的尝试和验证, 人们对于岩浆型铜镍硫化物矿床的地质认识不断加深, 从寻找层状大岩体中的铜镍矿到“小岩体成大矿”和“岩浆通道式成矿”, 同时用于铜镍矿勘探的地球物理手段也取得长足的进步, 从最初的“重-磁-电”综合勘探到如今的高分辨率浅层地震勘探、地-井 TEM 系统、井中重力勘探以及航空电磁法勘探. 不过, 其中仍存在着很多问题亟待解决, 下面试作简要分析, 以期今后铜镍矿地球物理勘探的发展方向提供些许帮助.

(1) 缺乏细致而系统的物性研究. 浅层地震勘探方法正广泛应用于全球范围内的铜镍矿勘探中, 但与此形成鲜明对比的是, 目前鲜有关于岩矿石在结晶岩环境下波阻抗性质的研究 (Malehmir *et al.*, 2013). 岩矿石的波阻抗与其中的硫化物含量有何关系呢? Salisbury 等 (1996) 在最初的研究中认为, 硫化物含量一定的矿石, 其波阻抗决定于岩石和矿物两个端元的线性组合, 但数据量太少; Malehmir 等 (2012) 收集并研究 Kevitsa 铜镍矿区深部钻孔中 11000 块岩石样品的波阻抗, 认为  $P$  波速度与岩石硫化物含量间并无明显相关关系, 但其主要矿石矿物磁黄铁矿理应对地震波速度有负相关作用. 如果今后能够系统分析岩矿石的波阻抗随硫化物含量的变化关系, 则通过浅层地震勘探则不仅能够圈定块状硫化物矿体, 还能够有效区分贫富矿体. 与此同时, 岩矿石波阻抗的各向异性, 其电阻率、极化率随硫化物含量的变化关系等, 也都是硫化物矿石物性研究中不可或缺的一环.

(2) 成矿模型中, 硫化物的物理性行为应受到重视. 随着



对岩浆型铜镍硫化物矿床认识的不断深入,逐步建立起成熟的成矿模型,从区域性地质背景、成矿元素的熔离和分配、硫化物饱和、围岩混染、硫化物与岩浆交换反应等角度进行归纳总结(Naldrett, 1999; Barnes and Lightfoot, 2005; Lightfoot, 2007; Maier and Groves, 2011)。但是,对矿床形成时硫化物在硅酸盐熔体和结晶相中运移、沉淀、聚集、连通等物理性行为的研究仍十分薄弱,仅 Mungall 和 Su(2005)通过二面角研究硫化物液滴在硅酸盐熔体中的湿润性,以及 Chung 和 Mungall(2009)基于物理学分析得出不混溶的硫化物液滴在部分熔融的硅酸盐中的运移行为。如果能够完整地分析硫化物液滴在矿床形成过程中的物理性行为,得出普适的规律性结论,则能够更好地理解矿床内岩石和矿体间的空间分布关系,服务于铜镍矿的地球物理勘探和解译工作。

(3)部分勘探方法的原理亟待完善。前述的高分辨率浅层地震反射波勘探对于铜镍矿体有着严格的要求,主要是源于很多矿体遵循惠更斯-菲涅尔原理,产生散射地震波。无论在理论层面还是方法技术上,都需要使用更广义的散射波地震理论来解决铜镍矿的勘探问题,从散射观点出发进行地震资料的采集、处理和解译(勾丽敏等, 2007; 尹军杰等, 2009)。但目前的研究程度还远远达不到实际应用的程度。现广泛应用于铜镍矿勘探的可控源音频大地电磁法由于近场效应以及原理的缺陷等问题,导致其勘探深度并不能达到现在的勘探需求,研究人员正尝试从不同的途径来努力完善大地电磁方法的原理和技术手段,以期满足金属矿的深部勘探要求。

(4)地球物理反演算法需要不断改进。地球物理反演算法在重力、磁场、电阻率剖面法、激发极化法、频率域电磁法、时间域电磁法等三维模拟和反演方面取得长足的进步(Oldenburg and Pratt, 2007)。重磁的三维反演技术已经广泛应用到勘探工作中,另外,对已有的重磁数据进行重新处理提取出其中蕴含的深度信息对铜镍矿勘探有着很大帮助(Romeo *et al.*, 2008; 杨学立, 2012; 姚绍萍等, 2012),激发极化法的二维、三维技术也逐渐成为常规的解释工具,而电磁勘探的三维反演方面则一直推进缓慢。此外,地-井 TEM 系统、井中重力勘探等新兴勘探方法的反演算法研究还处于初级阶段,需要进一步深入研究和改进,才能逐步应用于实际铜镍矿勘探的解译工作中。未来的发展趋势是反演软件操作的简单化和一体化,反演算法研究的有效化和科学化,以期在三维电磁和新兴物探方法的反演方面较大的突破(Oldenburg and Pratt, 2007)。

(5)多元数据融合,试图建立地质-地球物理模型。由于目标勘探深度的增加,地质环境更加复杂,加之地球物理的多解性,使得单一的地球物理勘探方法早已无法满足现代矿床勘探的要求,多元数据融合,多种方法综合运用,联合反演,相互印证,成为主流。这一思路在很多地区的铜镍矿勘探中都得到体现,如 Thompson 铜镍成矿带、Voisey's Bay、Sudbury、图拉尔根铜镍矿等。其中,以 Sudbury 矿区最为典型,几乎运用所有的地球物理勘探手段。瑞典北部 Kristineberg 矿区开展大量的地质、地球物理勘探工作,在详尽的反演和解释基础之上,将多种方法和多元数据综合起来,针对该地区建立起可靠而精细的地质-地球物理模型(Malehmir *et al.*, 2006, 2009a, 2009b; Tryggvason *et al.*,

2006),代表着未来矿床勘探的发展方向。

## 5 结 语

地球物理勘探方法在岩浆型铜镍矿的勘查中扮演着重要角色,很多矿床都是在早期物探异常的指导下,开展进一步地质和钻探工作后发现的。最初,从铜镍硫化物矿体所具有的“三高一低”(高密度、高磁化率,高极化率,低电阻率)物性特征出发,建立起一套广泛运用的地球物理勘探组合——即“重-磁-电”物探方法的有机结合,运用重磁同源异常圈定可能含矿的镁铁质、超镁铁质岩体,并在此基础上,开展瞬变电磁测深、大功率激电等电法勘探,寻找“低阻高极化”的铜镍硫化物矿体。然而,位于中亚造山带之中的北疆地区东天山造山带型铜镍矿带和阿尔泰山带喀拉通克岩体群体现出显著的“小岩体成大矿”特征,因岩体形态、成矿类型、矿体形状、赋存深度、碳质围岩干扰等因素的复杂性,而使得传统地球物理勘探方法在小岩体类型铜镍硫化物矿床的勘探中遇到瓶颈和难题。幸运的是,随着地球物理理论和勘探技术方法的不断发展和进步,一系列勘探深度更大、分辨能力更高、针对性更强、更为新颖有效的物探方法开始逐渐应用于岩浆型铜镍硫化物的勘探工作中,如高分辨率浅层地震勘探、地-井 TEM 系统、井中重力观测系统和航空电磁勘探。其中高分辨率浅层地震勘探可以直接圈定深部块状硫化物矿体,地-井 TEM 系统能够精细刻画钻孔周围矿体的形状、大小和矿化程度,井中重力观测则可以有效地排除围岩中碳质层的干扰,而航空电磁通常用于覆盖区铜镍矿的高精度勘探,可以直接指导随后的地面钻探工作,它们代表着铜镍矿勘探的发展方向。随着理论的不完善和方法技术的日益改进,包括物性的系统测定与研究,硫化物的物理性行为的理解更为深入,针对陡倾斜岩矿体的勘探方法原理的完善,地球物理反演算法特别是电磁勘探的三维反演的改进,以及多元数据融合、建立高质量的地质-地球物理模型,这些新的技术方法,连同传统技术方法的与时俱进、不断更新,必将更多地运用到复杂地质背景下小岩体型铜镍硫化物矿床的发现与勘探中,为我国古老造山带中岩浆铜镍矿的深部找矿勘探工作提供更大、更有效的帮助。

致 谢 在野外工作期间,得到新疆新鑫矿业股份公司党新生高工、何永胜高工,新疆有色地勘局侯启尧高工,新疆 305 项目办邵行来高工,新疆地矿局第四地质大队秦纪华总工、何立新副总工和喀拉通克铜镍矿王勇、王斌高工及地测科同行的大力支持。其间,还向危机矿山接替资源找矿项目办的刘士毅总工程师、颜廷杰高工,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所的邓晓红研究员、徐明才研究员,中国地质大学刘天佑教授请教相关问题。在本文写作过程中,中国科学院地质与地球物理研究所李光明副研究员给予很大鼓励和帮助,薛国强研究员和梁光河副研究员悉心审阅稿件,并提出宝贵意见,在此一并致以衷心的感谢!

## References

Balch S J, Crebs T J, King A, *et al.* 1998. Geophysics of the

- Voisey's Bay Ni-Cu-Co Deposits [C]. //SEG Technical Program Expanded Abstracts, Canada: Inco Limited, Field Exploration Office, Highway, 784-787.
- Balch S J, Boyko W P, Paterson N R. 2003. The Aero TEM airborne electromagnetic system[J]. *The Leading Edge*, 22(6): 562-566.
- Balch S J, Mungall J E, Niemi J. 2010. Present and future geophysical methods for Ni-Cu-PGE exploration: lessons from McFaulds Lake, Northern Ontario [J]. *Economic Geology*, (15): 559-572.
- Barnes S J, Lightfoot P C. 2005. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group contents [C]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 179-213.
- Birch F. 1960. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 1. [J]. *Journal of Geophysical Research*, 65(4): 1083-1102.
- Boyko W. 2001. AeroTEM characteristics and field results[J]. *The Leading Edge*, 20(10): 1130-1138.
- Cao H. 2004. A review of borehole geophysics [J]. *Progress in Exploration Geophysics (in Chinese)*, 27(4): 235-240.
- Cao L M. 2010. The status and trends of researching on the theory and technique of the location prediction for concealed orebody [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 25(3): 1037-1045, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.03.044.
- Carmichael R S. 1988. *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*[M]. United States: CRC Press.
- Chai F M, Zhang Z C, Mao J W, *et al.* 2005. Discussion on some problems concerning magmatic copper-nickel-PGE sulfide deposits[J]. *Mineral Deposits (in Chinese)*, 24(3): 325-335.
- Chai F M, Zhang Z C, Dong L H, *et al.* 2007. Geochemistry and petrogenesis of the Baishiquan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 23(10): 2366-2378.
- Chopping R, van der Wielen S. 2011. Mapping the footprint of ore deposits in 3D using geophysical data[J]. *AusGeo News*, 101: 1-5.
- Chung H Y, Mungall J E. 2009. Physical constraints on the migration of immiscible fluids through partially molten silicates, with special reference to magmatic sulfide ores[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1-2): 14-22.
- Deng Z Q. 1990. Geological geophysical model and guide of prospecting of copper-nickel sulphide deposit in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology (in Chinese)*, 8(3): 193-204.
- Ding X, Li C S, Ripley E M, *et al.* 2010. The eagle and east eagle sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusions in the midcontinent rift system, upper Michigan: Geochronology and petrologic evolution[J]. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 11(3), doi: 10.1029/2009GC002546.
- Dong Y S. 2003. Synthesis prospecting model of copper-nickel deposit of Hongqiling, Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese)*, 33(2): 152-155.
- Eaton D, Guest S, Milkereit B, *et al.* 1996. Seismic imaging of massive sulfide deposits: Part III, Borehole seismic imaging of near-vertical structures[J]. *Economic Geology*, 91(5): 835-840.
- Emerson D W, Williams P K, Luitens S. 2001. The conductivities of komatiitic nickel ores at Kambalda W. A. [J]. *ASEG Preview Magazine* June: 22-25.
- Fu K Q, Li B X. 2006. Geological and geophysical composite exploration model of Jinchuan copper-nickel sulfide deposit in Gansu Province[J]. *Gansu Geology (in Chinese)*, 15(1): 62-67.
- Gao H, Cao D H, Fan S J. 2009. Deep segregation-injection ore-forming process and metallogenetic model for magmatic Cu-Ni (PGE) sulfide deposits—Geological comparative study on two deposits exemplified by Voisey's Bay (Canada) and Jinchuan (China)[J]. *Geological Bulletin of China (in Chinese)*, 28(6): 794-803.
- Gou L M, Liu X W, Lei P, *et al.* 2007. Review of seismic survey in mining exploration: Part 1 theory and reflection seismic methods[J]. *Progress in Exploration Geophysics (in Chinese)*, 30(1): 16-24.
- Hearst R B, Morris W A, Thomas M D. 1994. Magnetic interpretation along the Sudbury structure lithoprobe transect [J]. *Geophysical Research Letters*, 21(10): 951-954.
- Huang R F, Sun W D, Ding X, *et al.* 2013. Mechanism for serpentinization of mafic and ultramafic rocks and the potential of mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 29(12): 4336-4348.
- Hui W D, Zhao P D, Qin K Z, *et al.* 2011. Application of comprehensive information to exploration of the Tulargen Cu-Ni sulfide deposit in Eastern Tianshan, Xinjiang [J]. *Geology and Prospecting (in Chinese)*, 47(3): 388-399.
- Jiang C Y, Ling J L, Zhao Y F, *et al.* 2012. Ore-bearing potential evaluation index system of mafic and ultramafic intrusions—used to search for magmatic sulfide deposits[J]. *Northwestern Geology (in Chinese)*, 45(4): 51-60.
- Jiang M, Tan H D, Qian H, *et al.* 2012. Geophysical deep structure and genetic model of Jinchuan copper-nickel deposit [J]. *Mineral Deposits (in Chinese)*, 31(2): 207-215.
- King A. 1996. Deep drillhole electromagnetic surveys for nickel/copper sulphides at Sudbury, Canada [J]. *Exploration Geophysics*, 27(3): 105-118.
- King A. 2007. Review of Geophysical Technology for Ni-Cu-PGE deposits[C]. //Milkereit B. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. 647-665.
- LaFehr T R. 1983. Rock density from borehole gravity surveys[J]. *Geophysics*, 48(3): 341-356.
- Li C S, Naldrett A J, Ripley E M. 2001. Critical factors for the formation of a nickel-copper deposit in an evolved magma system: lessons from a comparison of the Pans Lake and Voisey's Bay sulfide occurrences in Labrador, Canada [J]. *Mineralium Deposita*, 36(1): 85-92.
- Li J F. 2010. A study on measuring technology of fix-wing frequency domain airborne electromagnetic system (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Liang G H, Xu X W, Xiao Q B, *et al.* 2007. Application of magnetotelluric method to Cu-Ni ore exploration: A case study of Tulargen Cu-Ni deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Deposits (in Chinese)*, 26(1): 120-127.
- Lightfoot P C, Naldrett A J. 1994. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk, Special vol. 5*[M]. Ontario Geological Survey, 1-423.
- Lightfoot P C. 2007. Advances in Ni-Cu-PGE sulphide deposit models and implications for exploration technologies [C]. //Milkereit B. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. 629-646.
- Lou D B, Song G X, Li N, *et al.* 2008. The application of magnetic method in national mineral prediction [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 23(1): 249-256.
- Luo Z H, Marakushev A A, Paniakh H H, *et al.* 2000. The origin of copper-nickel sulfide deposits—Exemplified by Noril'sk (Russia) and Jinchuan (China) [J]. *Mineral Deposits (in Chinese)*, 19(4): 330-339.
- Lü L S, Liu J, Zhang Z H, *et al.* 2007. Temporal-spatial distribution and geodynamic setting of magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2561-2594.
- Maier W D, Li C S, De waal A. 2001. Why are there no major Ni-Cu sulfide deposits in large layered mafic-ultramafic intrusions? [J]. *Canadian Mineralogist*, 39(2): 547-556.
- Maier W D, Groves D I. 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposits[J]. *Miner. Deposita*, 46(8): 841-857.

- Malehmir A, Andersson M, Lebedev M, *et al.* 2013. Experimental estimation of velocities and anisotropy of a series of Swedish crystalline rocks and ores[J]. *Geophysical Prospecting*, 61(1): 153-167.
- Malehmir A, Bellefleur G. 2009. 3D seismic reflection imaging of volcanic-hosted massive sulfide deposits: Insights from reprocessing Halfmile Lake data, New Brunswick, Canada[J]. *Geophysics*, 74(6): B209-B219.
- Malehmir A, Juhlin C, Wijns C, *et al.* 2012. 3D reflection seismic imaging for open-pit mine planning and deep exploration in the Kevitsa Ni-Cu-PGE deposit, northern Finland[J]. *Geophysics*, 77(5): WC95-WC108.
- Malehmir A, Koivisto E, Manzi M, *et al.* 2014. A review of reflection seismic investigations in three major metallogenic regions: The Kevitsa Ni-Cu-PGE district (Finland), Witwatersrand goldfields (South Africa), and the Bathurst Mining Camp (Canada) [J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 423-441.
- Malehmir A, Thunehed H, Tryggvason A. 2009a. The Paleoproterozoic Kristineberg mining area, northern Sweden: Results from integrated 3D geophysical and geologic modeling, and implications for targeting ore deposits[J]. *Geophysics*, 74(1): B9-B22.
- Malehmir A, Schmelzbach C, Bongajum E, *et al.* 2009b. 3D constraints on a possible deep > 2.5 km massive sulphide mineralization from 2D crooked-line seismic reflection data in the Kristineberg mining area, northern Sweden [J]. *Tectonophysics*, 479(3): 223-240.
- Malehmir A, Tryggvason A, Juhlin C, *et al.* 2006. Seismic imaging and potential field modelling to delineate structures hosting VHMS deposits in the Skellefte Ore District, northern Sweden [J]. *Tectonophysics*, 426(3-4): 319-334.
- Mao Y J, Qin K Z, Tang D M, *et al.* 2014. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of eastern Tianshan, Xinjiang: Exemplified by Huangshan Ni-Cu deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 30(6): 1575-1594.
- McGaughey J. 2007. Geological models, rocks properties, and the 3d inversion of geophysical data [C]. //Milkereit B. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. 473-483.
- Milkereit B, Berré E K, King A R, *et al.* 2000. Development of 3-D seismic exploration technology for deep nickel-copper deposits—A case history from the Sudbury basin, Canada [J]. *Geophysics*, 65(6): 1890-1899.
- Milkereit B, Green A. 1992. Deep geometry of the Sudbury structure from seismic reflection profiling [J]. *Geology*, 20(9): 807-811.
- Mueller C, Bellefleur G, Adam E, *et al.* 2012. Performance of low-fold scalar migration for downhole seismic imaging of massive sulfide ore deposits at Norman West, Sudbury, Canada [J]. *Geophysics*, 77(5): W3-W13.
- Mungall J E, Ames D E, Hanley J J. 2004. Geochemical evidence from the Sudbury structure for crustal redistribution by large bolide impacts [J]. *Nature*, 429(6991): 546-548.
- Mungall J E, Su S G. 2005. Interfacial tension between magmatic sulfide and silicate liquids: Constraints on kinetics of sulfide liquation and sulfide migration through silicate rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(1-2): 135-149.
- Naldrett A J. 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis [J]. *Mineralium Deposita*, 34(3): 227-240.
- Naldrett A J. 2004. *Magmatic Sulfide Deposits Geology, Geochemistry and Exploration* [M]: Berlin: Springer, 1-305.
- Nind C, Seigel H O, Chouteau M, *et al.* 2007. Development of a borehole gravimeter for mining applications [J]. *EAGE*: 71-77.
- Oldenburg D W, Pratt D A. 2007. Geophysical inversion for mineral exploration: a decade of progress in theory and practice [C]. //Milkereit B. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Canada: Toronto, 61-95.
- Osmond R T, Watts A H, Ravenhurst W R, *et al.* 2002. Finding Nickel from the B-field at Raglan—"To B or not dB" [J]. *CSEG Recorder*, 27(9): 44-47.
- Perozzi L, Gloaguen E, Rondenay S, *et al.* 2012. Using stochastic crosshole seismic velocity tomography and Bayesian simulation to estimate Ni grades: Case study from Voisey's Bay, Canada [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 78: 85-93.
- Qian W, Milkereit B, Adam E, *et al.* 2004. BHEM data interpretation in the Louvicourt Mining Camp in Northern Quebec [C]. // Int' l exposition and 74th Annual Meeting. SEG, 1233-1236.
- Qin K Z, Ding K S, Xu Y X, *et al.* 2007. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits* (in Chinese), 26(1): 1-14.
- Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, *et al.* 2011. SIMS Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim basin (NW China): Constraints on a Ca. 280 Ma mantle plume [J]. *American Journal of Science*, 311(3): 237-260.
- Qin K Z, Tang D M, Su B X, *et al.* 2012. The tectonic setting, style, basic feature, relative erosion degree, ore-bearing evaluation sign, potential analysis of mineralization of Cu-Ni-bearing Permian mafic-ultramafic complexes, Northern Xinjiang [J]. *Northwestern Geology* (in Chinese), 45(4): 83-116.
- Qin K Z, Tian Y, Yao Z S, *et al.* 2014. Metallogenetic conditions, magma conduit and exploration potential of the Kalatongk Cu-Ni orefield in Northern Xinjiang [J]. *Geology in China* (in Chinese), 41(3): 912-935.
- Rempel G G. 1994. Regional geophysics at Noril'sk [M]//Lightfoot P C, Naldrett A J, ed. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk, Special vol. 5. Ontario Geological Survey*, 147-160.
- Romeo I, Tejero R, Capote R, *et al.* 2008. 3D gravity modelling of the Aguablanca Stock, tectonic control and emplacement of a Variscan gabbro-norite bearing a Ni-Cu-PGE ore, SW Iberia [J]. *Geol. Mag.*, 145(3): 345-359.
- Salisbury M H, Milkereit B, Ascough G, *et al.* 2000. Physical properties and seismic imaging of massive sulfides [J]. *Geophysics*, 65(6): 1882-1889.
- Salisbury M H, Milkereit B, Bleeker W. 1996. Seismic imaging of massive sulfide deposits: Part 1, rock properties [J]. *Economic Geology*, 91(5): 821-828.
- Salisbury M H, Harvey C, Matthews L. 2003. The acoustic properties of ores and host rocks [C]. //Eaton D, Milkereit B, Salisbury M. *Hardrock seismic exploration: society of exploration geophysicists. Geophysical Development Series*, 9-19.
- Salisbury M H, Snyder D. 2007. Application of seismic methods to mineral exploration [C] //Goodfellow W D. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Minerals Deposits Division, Special Publication No. 5*, 971-982.
- San J Z, Hui W D, Qin K Z, *et al.* 2007. Geological characteristics of Tulargen magmatic Cu-Ni-Co deposit in eastern Xinjiang and its exploration direction [J]. *Mineral Deposits* (in Chinese), 26(3): 307-316.
- Seigel H O, Nind C, Lachapell R, *et al.* 2007. Development of a Borehole Gravimeter for Mining Applications [C] //Milkereit B. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. 1143-1147.
- Shao X L. 2012. Research for geophysical characteristics and prospecting application on Huangshan-Jingerquan ultramafic complex belt Eastern Tianshan of Xinjiang (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Shao X L, Xue C J, Dai D W, *et al.* 2010. Characteristics of geophysical anomalies of the prospecting for Hulu magmatic Cu-

- Ni deposit in Hami of Xinjiang[J]. *Geoscience (in Chinese)*, 24(2): 383-391.
- Shao X L, Xue C J, Zhou Y M. 2012. The interpretation of ground magnetic on the Tulargen mafic-ultramafic complex in Hami, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology (in Chinese)*, 30(4): 425-429.
- Shen Y C, Shen P, Liu T B, *et al.* 2007. Geophysical prospecting and prognosis in the Jingerquan Cu-Ni deposit, Eastern Tianshan mountains[J]. *Geology and Prospecting (in Chinese)*, 43(2): 62-67.
- Smith N J. 1950. The case for gravity data from boreholes[J]. *Geophysics*, 15(4): 605-636.
- Smith R S, Annan P. 1998. The use of B-field measurements in an airborne time-domain system; Part I. Benefits of B-field versus dB/dt data[J]. *Exploration Geophysics*, 29(2): 24-29.
- Snyder D, Perron G, Pflug K, *et al.* 2002. New insights into the structure of the Sudbury Igneous Complex from downhole seismic studies[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39(6): 943-951.
- Song L J, Zhu J Y. 2004. The model of geophysical metallogenic prognosis of Baimazhai nickel-deposit of Jinping county [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 19(1): 186-190.
- Su B X, Qin K Z, Sun H, *et al.* 2010. Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang: Implications for assimilation and fractional crystallization [J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 25(4): 873-887.
- Sun D M. 2010. The study of frequency domain airborne electromagnetic data processing methods (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Changchun: Jilin University.
- Tang Z L. 1992. Classification and geological contrastable significance of super large magmatic sulfide deposits[J]. *Acta Geologica Gansu (in Chinese)*, 1(1): 24-47.
- Tang Z L. 1996a. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in China [J]. *Acta Geologica Sinica (in Chinese)*, 70(3): 237-243.
- Tang Z L. 1996b. Main types of magma sulfide deposits in China [J]. *Acta Geologica Gansu (in Chinese)*, 5(1): 45-49.
- Tang Z L, Qian Z Z, Jiang C Y, *et al.* 2011. Trends of research in exploration of magmatic sulfide deposits and small intrusions metallogenic system [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment (in Chinese)*, 33(1): 1-9.
- Tang Z L, Yan H Q, Jiao J G, *et al.* 2006. New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small intrusive bodies [J]. *Mineral Deposits (in Chinese)*, 25(1): 1-9.
- Tang Z L, Yan H Q, Jiao J G, *et al.* 2007. Regional metallogenic controls of small-intrusion-hosted Ni-Cu(PGE) ore deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 14(5): 92-103.
- Teng J W, Yang L Q, Yao J Q, *et al.* 2007. Deep discover ore, exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 22(2): 317-334.
- Tryggvason A, Malehmir A, Rodriguez-Tablante J, *et al.* 2006. Reflection seismic investigations in the western part of the Paleoproterozoic VHMS-bearing Skellefte District, northern Sweden[J]. *Economic Geology*, 101(5): 1039-1054.
- Wang B R, Li H Z, Ran X F. 1993. Borehole gravity measurement and its application prospects in China's petroleum exploration [J]. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 28(3): 339-347.
- Wen M L, Luo X R. 2013. A study of the ore-prospecting work based on multiple geosciences information in the Jinchuan Cu-Ni deposit[J]. *Geology in China (in Chinese)*, 40(2): 594-601.
- Witherly K. 2009. Geophysical response of the Munali Ni-Cu deposit, Zambia[C]. ASEG/PESA Conference, 1-4.
- Wu H, Xu X W, Mo X H, *et al.* 2006. Exploration by combined geophysical methods and location prediction of buried Cu-Ni deposits in the Baishiquan area, eastern Tianshan Xinjiang [J]. *Geology in China (in Chinese)*, 33(3): 672-681.
- Xia M Z, Jiang C Y, Qian Z Z, *et al.* 2008. Geochemistry and petrogenesis for Hulu intrusion in East Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 24(12): 2749-2760.
- Xiao Q B, Cai X p, Xu X W, *et al.* 2005. Application of shallow seismic technology and magnetotellurics to location prognosis of concealed metallic deposits: Case study of Tulargen Cu-Ni mining area, Hami, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits (in Chinese)*, 24(6): 676-683.
- Xiao Q H, Qin K Z, Tang D M, *et al.* 2010. Xiangshanxi composite Cu-Ni-Ti-Fe deposit belongs to comagmatic evolution product: evidences from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and petrological geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica (in Chinese)*, 26(2): 503-522.
- Xu G D, Huang J J, Liu D J, *et al.* 2010. Application of TEM in Hongqiling copper-nickel exploration geophysics in Jilin Province[J]. *Jilin Geology (in Chinese)*, 29(4): 79-83.
- Yan J Y, Teng J W, Lü Q T. 2008. Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 23(3): 871-891.
- Yang X L. 2012. Research of geophysical methods on deep Cu-Ni sulfide deposit exploration-Case studies on Hongqiling Cu-Ni sulfide deposit (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Yao S P, Xu R H, Yan J L, *et al.* 2012. The application of gravitational method of exploration in analyzing construction of transmissive mine[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 27(4): 1679-1686.
- Ye Y X, Deng J Z, Li M, *et al.* 2011. Application status and vistas of electromagnetic methods to deep ore prospecting [J]. *Progress in Geophys. (in Chinese)*, 26(1): 327-334, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.01.039.
- Yin J J, Wang W, Wang Y, *et al.* 2009. A case study: the numerical simulation and imaging of seismic scattered waves applied to the Tongling ore field[J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 24(4): 1367-1376.
- Zhang J, Deng X H, Guo X, *et al.* 2013. Typical cases of applying borehole TEM to deep prospecting in crisis mines [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese)*, 37(1): 30-34.
- Zhou H Y. 2002. Studying on the model of rock-forming and ore-forming, and the prospecting prediction for Karatungk magmatic Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Changsha: Central South University.

## 附中文参考文献

- 曹辉. 2004. 井中地球物理技术综述[J]. *勘探地球物理进展*, 27(4): 235-240.
- 曹令敏. 2010. 隐伏矿床定位预测理论和技术的研究现状及发展趋势[J]. *地球物理学进展*, 25(3): 1037-1045, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.03.044.
- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 等. 2005. 岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床研究的几个问题探讨[J]. *矿床地质*, 24(3): 325-335.
- 柴凤梅, 张招崇, 董连慧, 等. 2007. 新疆中天山白石泉含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体地球化学特征与岩石成因[J]. *岩石学报*, 23(10): 2366-2378.
- 邓振球. 1990. 新疆铜镍硫化物矿床地质-地球物理模式及找矿标志[J]. *新疆地质*, 8(3): 193-204.
- 董耀松. 2003. 吉林红旗岭铜镍矿床综合找矿模型[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 33(2): 152-155.
- 付开泉, 李百祥. 2006. 甘肃金川铜镍矿床地质-地球物理综合找矿模型[J]. *甘肃地质*, 15(1): 62-67.
- 高辉, 曹殿华, 范世家. 2009. 岩浆铜-镍-铂族金属硫化矿床“深部

- 熔离-贯入”成矿作用与模式——加拿大伏伊希湾和中国金川矿床地质特征对比[J]. 地质通报, 28(6): 794-803.
- 勾丽敏, 刘学伟, 雷鹏, 等. 2007. 金属矿地震勘探技术方法研究综述——金属矿地震看靶技术及其现状[J]. 勘探地球物理进展, 30(1): 16-24.
- 黄瑞芳, 孙卫东, 丁兴, 等. 2013. 基性和超基性岩蛇纹石化的机理及成矿潜力[J]. 岩石学报, 29(12): 4336-4348.
- 惠卫东, 赵鹏大, 秦克章, 等. 2011. 东天山图拉尔根铜镍硫化物矿床综合信息找矿模型的应用[J]. 地质与勘探, 47(3): 388-399.
- 姜常义, 凌锦兰, 赵彦锋, 等. 2012. 镁铁质-超镁铁质岩体含矿性评价指标体系——应用于寻找岩浆硫化物矿床[J]. 西北地质, 45(4): 51-60.
- 姜枚, 谭捍东, 钱辉, 等. 2012. 金川铜镍矿床的地球物理深部结构与成因模式[J]. 矿床地质, 31(2): 207-215.
- 李军峰. 2010. 固定翼频率域航空电磁系统测量技术研究[博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 梁光河, 徐兴旺, 肖骑彬, 等. 2007. 大地电磁测深法在铜镍矿勘查中的应用——以与超镁铁质岩有关的新疆图拉尔根铜镍矿为例[J]. 矿床地质, 26(1): 120-127.
- 姜德波, 宋国玺, 李楠, 等. 2008. 磁法在我国矿产预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 23(1): 249-256.
- 罗照华, Marakushev A A, Paniakh H H 等. 2000. 铜镍硫化物矿床的成因——以诺里尔斯克(俄罗斯)和金川(中国)为例[J]. 矿床地质, 19(4): 330-339.
- 吕林素, 刘琨, 张作衡, 等. 2007. 中国岩浆型 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的时空分布及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2561-2594.
- 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅, 等. 2014. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用——以黄山铜镍矿床为例[J]. 岩石学报, 30(6): 1575-1594.
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 等. 2007. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. 矿床地质, 26(1): 1-14.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 等. 2012. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. 西北地质, 45(4): 83-116.
- 秦克章, 田野, 姚卓森, 等. 2014. 新疆喀拉通克铜镍矿田成矿条件、岩浆通道与成矿潜力分析[J]. 中国地质, 41(3): 912-935.
- 三金柱, 惠卫东, 秦克章, 等. 2007. 新疆哈密图拉尔根全岩矿化岩浆铜-镍-钴矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 26(3): 307-316.
- 邵行来. 2012. 东天山黄山-镜儿泉超镁铁岩带地球物理特征研究及找矿应用[博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 邵行来, 薛春纪, 戴德文, 等. 2010. 新疆哈密葫芦岩浆 Cu-Ni 矿勘查地球物理异常特征[J]. 现代地质, 24(2): 383-391.
- 邵行来, 薛春纪, 周耀明. 2012. 哈密图拉尔根镁铁-超镁铁岩磁法异常解释[J]. 新疆地质, 30(4): 425-429.
- 沈远超, 申萍, 刘铁兵, 等. 2007. 东天山镜儿泉铜镍矿床成矿预测及 EH4 地球物理测量依据[J]. 地质与勘探, 43(2): 62-67.
- 宋立军, 朱杰勇. 2004. 金平白马寨铜镍矿床地球物理成矿预测模式[J]. 地球物理学进展, 19(1): 186-190.
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 2009. 新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征: 对同化混染和结晶分异过程的启示[J]. 岩石学报, 25(4): 873-887.
- 孙东明. 2010. 频率域航空电磁法数据处理方法研究[博士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 汤中立. 1992. 超大型岩浆硫化物矿床的类型及地质对比意义[J]. 甘肃地质学报, 1(1): 24-47.
- 汤中立. 1996a. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 70(3): 237-243.
- 汤中立. 1996b. 中国岩浆硫化物矿床的主要类型[J]. 甘肃地质学报, 5(1): 45-49.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 2011. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. 地球科学与环境学报, 33(1): 1-9.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 2006. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. 矿床地质, 25(1): 1-9.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 2007. 中国小岩体铜镍(铂族)矿床的区域成矿规律[J]. 地质前缘, 14(5): 92-103.
- 滕吉文, 杨立强, 姚敬全, 等. 2007. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程[J]. 地球物理学进展, 22(2): 317-334.
- 王宝仁, 李虎占, 冉雪峰. 1993. 井中重力测量及其在我国石油勘探中的应用前景[J]. 石油地球物理勘探, 28(3): 339-347.
- 文美兰, 罗先熔. 2013. 金川铜镍矿床多元地学信息找矿研究[J]. 中国地质, 40(2): 594-601.
- 吴华, 徐兴旺, 莫新华, 等. 2006. 东天山白石泉矿区地球物理多方法联合探查与隐伏铜镍矿定位预测[J]. 中国地质, 33(3): 672-681.
- 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 2008. 新疆东天山葫芦岩体岩石学与地球化学研究[J]. 岩石学报, 24(12): 2749-2760.
- 肖骑彬, 蔡新平, 徐兴旺, 等. 2005. 浅层地震与 MT 联合技术在隐伏金属矿床定位预测中的应用——以新疆哈密图拉尔根铜镍矿区为例[J]. 矿床地质, 24(6): 676-683.
- 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 等. 2010. 新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物——矿相学、锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 26(2): 503-522.
- 徐贵东, 黄继军, 刘德君, 等. 2010. 瞬变电磁在吉林省红旗岭铜镍矿勘查中的应用[J]. 吉林地质, 29(4): 79-83.
- 严加永, 滕吉文, 吕庆田. 2008. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用[J]. 地球物理学进展, 23(3): 871-891.
- 杨学立. 2012. 铜镍硫化物矿床深部找矿地球物理方法综合研究——以吉林省磐石县红旗岭铜镍矿为例[博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 姚绍萍, 徐荣华, 晏俊灵, 等. 2012. 重力勘探法在侵入岩体导矿构造上的分析应用[J]. 地球物理学进展, 27(4): 1679-1686.
- 叶益信, 邓居智, 李曼, 等. 2011. 电磁法在深部找矿中的应用现状及展望[J]. 地球物理学进展, 26(1): 327-334, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.01.039.
- 尹军杰, 王伟, 王赞, 等. 2009. 地震散射波模拟成像方法在铜陵某矿区的应用[J]. 地球物理学进展, 24(4): 1367-1376.
- 张杰, 邓晓红, 郭鑫, 等. 2013. 地-井 TEM 在危机矿山深部找矿中的应用实例[J]. 物探与化探, 37(1): 30-34.
- 邹海洋. 2002. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床成岩成矿模式及找矿预测研究[博士学位论文]. 长沙: 中南大学.